

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Josip Vidak

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Doc. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.
Matija Bušić, dipl. ing.

Student:

Josip Vidak

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svima koji su mi pomogli u pripremi ovog rada. Mentor rada doc.dr.sc. Ivici Garašiću i asistentu Matiji Bušiću, dipl. ing. na savjetima i podršci pruženim tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem tehničkom osoblju Laboratorija za zavarivanje i Laboratorija za zaštitu materijala jer su mi omogućili izvođenje eksperimentalnog dijela rada te svima koji su na bilo koji način pridonijeli nastanku ovog rada.

Također se od srca zahvaljujem svojim roditeljima na podršci koju su mi pružili tokom studija.

Josip Vidak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **JOSIP VIDAK**

Mat. br.: **0035181584**

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **ROBOTIZIRANO TIG ZAVARIVANJE**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **ROBOTIZED TIG WELDING**

Opis zadatka:

Opisati TIG postupak zavarivanja i analizirati sve opcije automatizacije i robotizacije s posebnim naglaskom na koncept vruće žice. Definirati zahtjeve za kobfiguraciju i arhitekturu robotske stanice pogodne za primjenu TIG zavarivanja i ukratko opisati primjenu senzora za korekciju putanje zavarivanja. Dati primjere iz industrijske proizvodnje sa naglaskom na pripremu i parametre zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu na robotskoj stanici OTC Almega na odgovarajućem osnovnom materijalu i obliku spoja izraditi program za TIG zavarivanje bez dodatnog materijala. Propisati sve tehnološke parametre zavarivanja i pripreme spoja. U konačnici ocijeniti kvalitetu dobivenog zavara i dati preporuke za primjenu u realnoj proizvodnji.

Zadatak zadan:
25. studenog 2014.

Rok predaje rada:
1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 2., 3., 4. ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., 23. rujna 2015.
Predsjednik Povjerenstva:

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Ivica Garašić

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Sadržaj

Sadržaj	I
Popis slika	III
Popis tablica	IV
Popis oznaka.....	V
Sažetak	VI
Summary	VI
1.Uvod	1
2. TIG postupak zavarivanja	2
2.1. Općenito o TIG postupku zavarivanja.....	2
2.2. Oprema za TIG zavarivanje.....	4
2.2.1. Izvori struje za TIG zavarivanje.....	4
2.2.2. Pištolj za zavarivanje	5
2.2.3. Sapnica za zaštitni plin.....	6
2.3. Zaštitni plinovi za TIG zavarivanje	7
2.4. Modificirane varijante TIG zavarivanja	7
2.4.1. Impulsno TIG zavarivanje	8
2.4.2. TIG točkasto zavarivanje	8
2.4.3. Orbitalno TIG zavarivanje	8
2.4.4. Visokoučinsko TIG zavarivanje s aktivirajućim praškom.....	9
2.4.5. K-TIG -visoko penetracijski postupak - „keyhole”	9
2.5. TIP TIG postupak zavarivanja.....	10
2.5.1. Osnovni koncept postupka.....	10
2.5.2. Uređaj za TIP TIG zavarivanje	11
2.5.3. TIP TIG zavarivanje s hladnom žicom	15
2.5.4. TIP TIG postupak zavarivanja s vrućom žicom	15
2.5.5. Problemi koji se javljaju prilikom TIG zavarivanja s vrućom žicom.....	18
2.5.6. Analiza unosa topline.....	19
3. Primjeri primjene TIP TIG postupka u praksi.....	20
4. Industrijske robotske stanice u zavarivanju	22
4.1. Općenito o industrijskim robotima	22
4.2. Programiranje robota za zavarivanje	25

4.2.1. On-line metoda programiranja	26
4.2.2. Off-line metoda programiranja	26
4.2.3. Hibridna (mješovita) metoda programiranja.....	27
4.3. Primjena senzora kod robotiziranog zavarivanja.....	27
4.3.1. Senzori za mjerenje tehnoloških parametara	28
4.3.2. Senzori za praćenje žlijeba i putanje zavarivanja	28
5. Eksperimentalni dio.....	32
5.1. Robotska stanica VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm.....	32
5.1.1. Mehanički sustav robota Almega AX-V6.....	34
5.1.2. Izvor struje VARTIG 3500 digit AC/DC.....	38
5.2. Robotizirano navarivanje.....	38
5.2.1. Osnovni materijal	38
5.2.2. Volframova elektroda	39
5.2.3. Zaštitni plin	39
5.2.4. Programiranje robota.....	40
5.2.5. Mijenjanje parametara navarivanja	42
5.2.6. Robotizirano navarivanje	43
5.3. Analiza i rezultati ispitivanja	45
6. Zaključak	48
7. Literatura	49

Popis slika

Slika 1. Princip procesa u električnom luku kod TIG zavarivanja [3]	3
Slika 2. Shematski prikaz TIG zavarivanja (ohlađivan vodom) [4]	4
Slika 3. Pištolj za TIG zavarivanje [6]	5
Slika 4. Najčešće korištene izvedbe sapnica [7]	6
Slika 5. Turbolentno i laminarno strujanje zaštitnog plina [8]	7
Slika 6. Orbitalno TIG zavarivanje [5]	9
Slika 7. Koncept i tehnika rada kod TIP TIG zavarivanja [14]	11
Slika 8. Shematski prikaz spajanja komponenti [14]	11
Slika 9. Unutrašnjost dodavača žice, sustav s četiri kotačića [14]	12
Slika 10. Shematski prikaz gibanja koje ostvaruje dodavač žice [14]	12
Slika 11. Prikaz dinamičkog gibanja [15]	13
Slika 12. Grafički prikaz pretvorbe frekvencije osciliranja dodatnog materijala iz mjerne jedinice Faktor u mjernu jedinicu Hz [9]	14
Slika 13. Usporedba količine nataljenog dodatnog materijala pri TIG zavarivanju s hladnom i vrućom žicom; promjer žice 1,6 mm, horizontalan položaj (PA) [16]	16
Slika 14. Proizvodnja hidrauličkih cilindara, Češka republika [24]	20
Slika 15. Proizvodnja kotlova, Velika Britanija [24]	20
Slika 16. Proizvodnja tlačnih posuda, Njemačka [24]	21
Slika 17. Proizvodi za prehrambenu industriju, Njemačka [24]	21
Slika 18. Shematski prikaz segmenata i zglobova robotskom manipulatora [18]	22
Slika 19. 3D shematski prikaz industrijskog robota sa 6 stupnjeva slobode gibanja [19]	23
Slika 20. Pojednostavljeni primjer upravljanja industrijskim robotom [18]	24
Slika 21. Modularna arhitektura adaptivnog upravljanja robotiziranim	25
Slika 22. Način detekcije radnog komada uz pomoć kontaktnog električnog senzora [23]	29
Slika 23. Grafički model robota s optičkim senzorom za praćenje žlijeba [22]	29
Slika 24. Shematski prikaz procesa zavarivanja kod kojeg nema devijacije žlijeba [22]	31
Slika 25. 3D model robotske stanice s robotom OTC Almaga AX-V6 [25]	32
Slika 26. Privjesak za učenje	33
Slika 27. Robot OTC Almaga AX-V6	34
Slika 28. Radni prostor robota AX-V6 [25]	35
Slika 29. Struktura robota AX-V6 [25]	36
Slika 30. Stezanje osnovnog materijala	39
Slika 31. AX-C kontroler	40
Slika 32. Odabir programa za izvođenje postupka navarivanja	41
Slika 33. Robotski program broj 70	41
Slika 34. Prozor za zadavanje parametara	42
Slika 35. Prozor za zadavanje vrijednosti jakosti struje	42
Slika 36. Odabir načina rada	43
Slika 37. Postavljanje u automatski rad na privjesku za učenje	44
Slika 38. Ispitna ploča s navarima	45
Slika 39. Mikroskop Leica MZ6	46

Popis tablica

Tablica 1. Tablični prikaz pretvorbe frekvencije osciliranja dodatnog materijala iz mjerne jedinice Faktor u mjernu jedinicu Hz [9]	13
Tablica 2. Usporedba mogućnosti i značajki TIP TIG postupka s vrućom žicom u odnosu na srodne postupke zavarivanja [16]	17
Tablica 3. Problemi koji se javljaju kod TIG zavarivanja vrućom žicom [17]	18
Tablica 4. Tehničke karakteristike robota [25]:	37
Tablica 5. Tehničke karakteristike izvora struje VARTIG 3500 digit AC/DC [26]	38
Tablica 6. Kemijska analiza austenitnih AISI 304 ploča debljine 5 [mm]	39
Tablica 7. Prikaz makroizbrusaka za različite vrijednosti struje i napona uz 100% Ar	46
Tablica 8. Prikaz makroizbrusaka za različite vrijednosti struje i napona uz 95% Ar	47

Popis oznaka

TIG	elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom sa ili bez dodatnog materijala
Ø elektrode	promjer elektrode (mm)
Cr	krom
Ni	nikal
Al	aluminij
Mg	magnezij
AC	izmjenična struja
DC	istosmjerna struja
K-TIG	visoko penetracijski TIG postupak
A-TIG	TIG zavarivanje aktivirajućim praškom
TIP	tehnologija inženjera Placha
Q_{DM}	toplina dodatnog materijala [J]
I_{DM}	jakost struje predgrijavanja dodatnog materijala [A]
R_{DM}	otpor dodatnog materijala [Ω]
t_z	vrijeme zavarivanja [s]
ZUT	zona utjecaja topline
Q	ukupna toplina [kJ/mm]
Q_{EL}	toplina električnog luka [kJ/mm]
Q_{DM}	toplina dodatnog materijala, tj. toplina predgrijane žice [kJ/mm]
I_z	jakost struje zavarivanja [A]
U	napon električnog luka [V]
v_z	brzina zavarivanja [mm/min]
η	stupanj iskoristivosti električnog luka prema HRN EN – 1011-1.1998
TCP	središnja točka alata
C	ugljik
Mn	mangan
Mo	molibden
Si	silicij
V	vanadij
Cu	bakar
Ar	argon

Sažetak

U ovom radu opisan je TIG postupak zavarivanja, te su analizirane sve opcije automatizacije i robotizacije postupka. S posebnim naglaskom je analizirana modernizirana varijanta TIG postupka zavarivanja uz primjenu automatskog dodavanja žice, tj. TIP TIG postupak. Prikazane su prednosti i mane koji se javljaju, oprema i vrste TIP TIG postupka te su dani primjeri iz industrijske proizvodnje.

Također u teorijskom dijelu je obrađena robotizacija zavarivanja, konfiguracija robotske stanice za zavarivanje, načini programiranja robota za zavarivanje te je opisana primjena senzora za korekciju putanje zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu rada na robotskoj stanici OTC Almega AXV6 na odgovarajućem osnovnom materijalu je izrađen program te je dan prikaz zadavanja parametara na robotskoj stanici za TIG navarivanje bez dodatnog materijala.

Ključne riječi: zavarivanje, robot, TIG, TIP TIG, programiranje

Summary

This paper describes the TIG welding process and analyzes all options of process automatization and robotization. With special focus was analyzed modernized variant of TIG welding proces with the use of automatic wire feed, ie. TIP TIG. There are shown advantages and disadvantages that arise, equipment and types TIP TIG process, as well as examples from industrial production.

Also theoretical part deals with robotization of welding, the configuration of robotic welding cell, programming robots for welding, and also the use of sensors for trajectory correction welding is described.

In the experimental part of this paper at the robotic cell OTC Almega AXV6 was created a program for facing on the appropriate base material, and it is also given an overview of setting parameters on the robotic station for TIG welding on without additional material.

Key words: welding, robot, TIG, TIP TIG, programing

1.Uvod

Zavarivanje je postupak koji ima značajnu ulogu tijekom oblikovanja i izradbe proizvoda i raznih konstrukcija načinjenih iz metalnih ili nemetalnih materijala. Kao sve ostale vrste spajanja materijala i zavarivanje ima svoj osnovni cilj, a to je osiguranje kompaktnosti spojenih dijelova i mogućnosti pouzdanog podnošenja predviđenih naprezanja.

Kako je zavarivanje općenito težak i monoton posao, ponekad i opasan po život zavarivača, javila se potreba za uvođenjem automatiziranog sustava, odnosno robota u sam proces.

Zbog mnogostranosti primjene industrijskih robota u današnjici, teško je postaviti definiciju koja bi navedenom pojmu dala jedinstveno značenje. Najpreciznija definicija kojom ih možemo opisati je ta da je industrijski robot automatski upravljani, višefunkcionalan, reprogramabilan, manipulacijski uređaj s nekoliko stupnjeva slobode, koji može biti statičan ili pokretan. [1] Najvažnije svojstvo industrijskih robota je mogućnost reprogramiranja kojim ih se osposobljava za obavljanje novih funkcija i time doprinosi svestranosti u industrijskoj primjeni.

Otegotnu okolnost za čovjeka isto tako predstavljaju prisilni i neprikladni položaji rada u kojima robot može izvesti kvalitetniji i jednoličniji spoj. Uzimajući u obzir i činjenicu da robot u proizvodnim uvjetima može obavljati svoju zadaću učinkovitije, postaje nesumnjivo da roboti i te kako mogu zamijeniti čovjeka zavarivača, što u suvremenim industrijskim prilikama vrlo često i jest slučaj.

2. TIG postupak zavarivanja

2.1. Općenito o TIG postupku zavarivanja

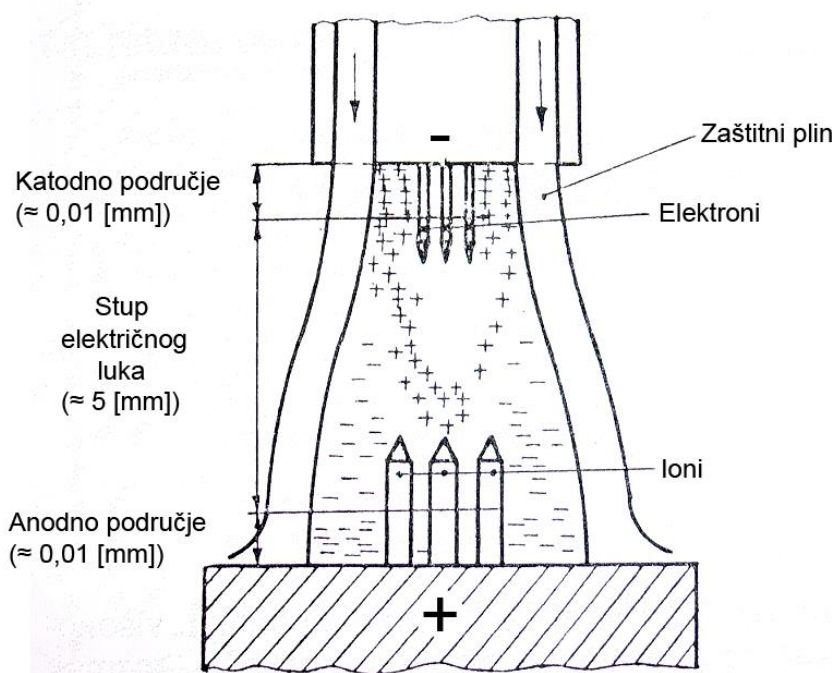
Zavarivanje TIG postupkom ili elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina, je postupak zavarivanja u neutralnom zaštitnom plinu ili neutralnoj smjesi plinova, koji koristi netaljivu volframovu elektrodu (ili volfram s dodacima, npr. torijevog oksida ili oksida drugih elemenata kao cirkonij, lantan, itrij) i posebno dodatni materijal. [2]

TIG postupak razvijen je za potrebe zrakoplovne industrije za zavarivanje legura lakih metala, a kasnije se njegova primjena proširila i na izradbu uređaja i postrojenja za kemijsku i procesnu industriju gdje se zavaruju nehrđajući čelici, aluminij, bakar i njihove legure.

Princip zavarivanja je vrlo jednostavan. Naime električni luk se uspostavlja između netaljive volfram elektrode i osnovnog materijala, pri čemu se uspostavljanje električnog luka vrši sa i bez dodira volframove elektrode s radnim komadom: [3]

1. Uspostavljanje električnog luka sa dodiranjem volframove elektrode s radnim komadom. Upotrebljava se kod uređaja za zavarivanje istosmjernom strujom koji nemaju u sebi ugrađen uređaj visokofrekventne električne struje. Provodi se laganim povlačenjem vrha elektrode po površini radnog komada. Nakon što se vrh elektrode dotakne s radnim komadom zatvori se strujni krug i poteče električna struja te se odmicanjem vrha elektrode od radnog komada uspostavi električni luk kroz ionizirani zaštitni plin.
2. Uspostavljanje električnog luka bez dodira volframove elektrode s radnim komadom. Uglavnom se koristi ovaj način uspostave električnog luka, i to uz pomoć visokofrekventne električne struje. Vrh elektrode se prinese blizu površine radnog komada (na oko \varnothing elektrode) te visokonaponska, visokofrekventna struja „preskoči“ razmak između vrha elektrode i radnog komada u vidu izboja iskri i tako stvori električni luk.

Kod uspostavljanja i održavanja električnog luka glavni nosilac ionizacije je zaštitni plin.



Slika 1. Princip procesa u električnom luku kod TIG zavarivanja [3]

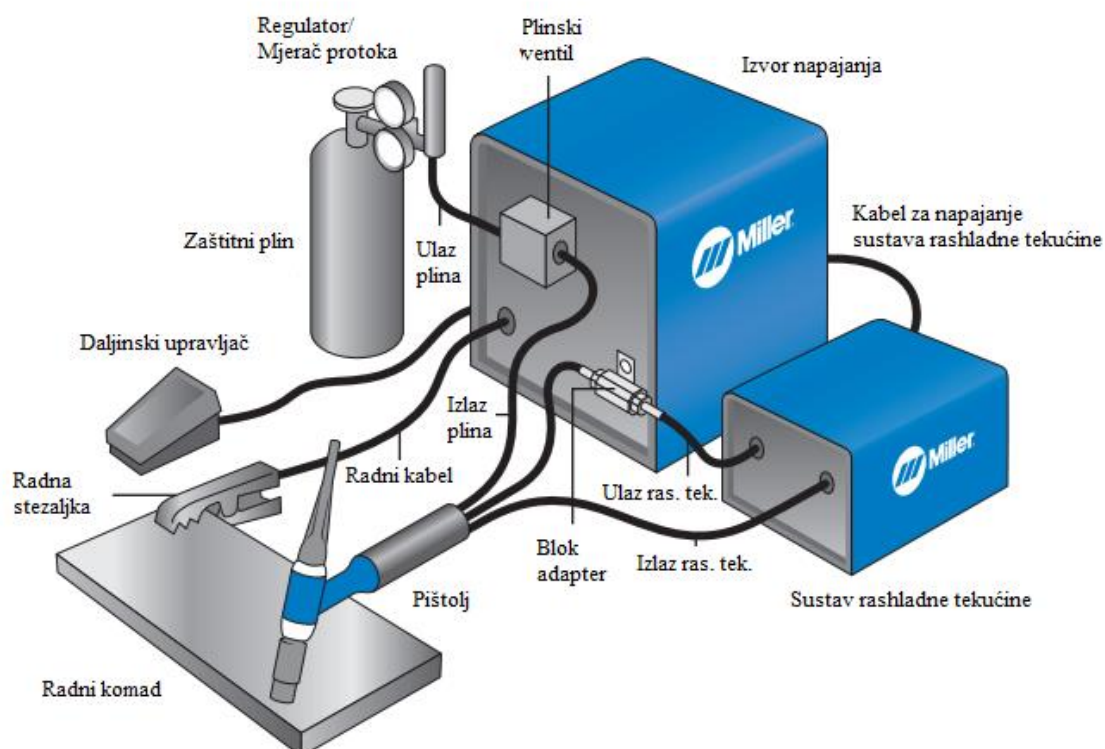
Električni luk kod TIG zavarivanja sastoji se iz anodnog i katodnog područja te područja stupa električnog luka: [3]

1. Anodno područje električnog luka ili područje plus pola je ispred anode. Male je veličine ($\approx 0,01$ mm), a sastoji se od oblaka elektrona koji velikom brzinom udaraju na anodu i tu oslobađaju svoju energiju, pri čemu se razvija toplina na anodi (2000 – 5000 K) pri čemu se tali metal.
2. Katodno područje električnog luka ili područje minus pola nalazi se ispred katode. Također je male veličine ($\approx 0,01$ mm), a sastoji se od oblaka iona koji su privučeni katodom i koji velikom brzinom udaraju na površinu katode, pri čemu se također razvija toplina (manja nego na anodi).
3. Stup električnog luka je najduže područje (3 – 5 mm), ovisno o naponu električnog luka, a nalazi se između anodnog i katodnog područja. Sastoji se od mješavine elektrona, iona, neutralnih atoma i molekula. Uslijed privlačnih sila katode i anode kroz područje stupa električnog luka prolaze elektroni i ioni te se tako održava električni luk.

Prednosti ovog postupka su: primjenjiv za zavarivanje svih materijala, nema rasprskavanja kapljica, zavarivanje u svim položajima, zavarivanje u radionici i na terenu, visoka kvaliteta zavara, nema troske, dima i isparavanja, raspon debljina 1-6mm, brzina dodavanja dodatnog materijala je nezavisna o energiji električnog luka te mogućnost automatizacije o kojoj će biti govora u sljedećim poglavljima.

S druge strane nedostaci su: neekonomičnost za veće debljine (mala količina nataljenog materijala), otežan rad na otvorenom, potrebna kvalitetna priprema spoja, čistoća površine, utjecaj ljudskog faktora, cijena plina.

2.2. Oprema za TIG zavarivanje



Slika 2. Shematski prikaz TIG zavarivanja (ohlađivan vodom) [4]

2.2.1. Izvori struje za TIG zavarivanje [5]:

- DC izvori- Cr-Ni čelici, nelegirani čelici, titan
- AC/DC izvori – Al, Mg
- AC skuplji zbog HF modula (uspostavljanje i održavanje električnog luka!)
- strmopadajuća karakteristika

2.2.2. Pištolj za zavarivanje

Pištolji za TIG zavarivanje se mogu podijeliti u dvije osnovne grupe [3]:

1. Bez hlađenja rashladnom tekućinom

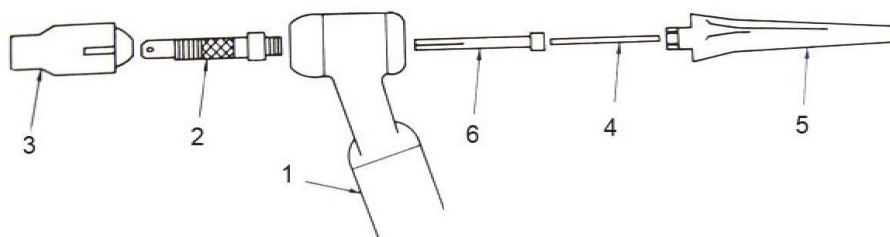
- hladi se samo zrakom,
- manje jakosti struje zavarivanja (150-200 A),
- kraća vremenska opterećenja.

2. S hlađenjem rashladnom tekućinom

- rashladna tekućina je voda ili antifriz,
- veće jakosti struje zavarivanja,
- duža vremenska opterećenja.

Postoje pištolji različitih oblika i dimenzija, ovisno o mjestu na kojem se zavaruje te pristupačnosti mjesta zavora. Tipičan pištolj za ručno TIG zavarivanje sastoji se od [3]:

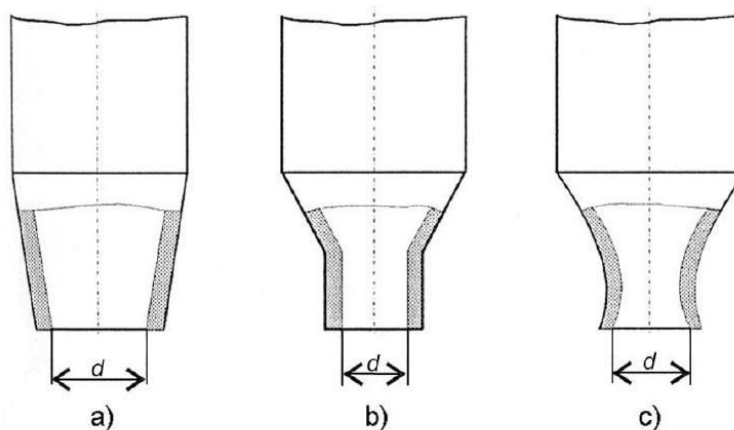
1. držača za ruku – u njemu završavaju svi provodnici (el. struje za zavarivanje, el. struje za komande, dovod i odvod vode, dovod plina) te se nalazi gumb za uključivanje procesa zavarivanja,
2. stezač volframove elektrode sa steznom kontaktnom cjevčicom,
3. sapnice za plin,
4. volframove elektrode,
5. zaštitne kape na volframovoj elektrodi,
6. kontaktne cjevčice – služi za dovođenje struje zavarivanja na elektrodu



Slika 3. Pištolj za TIG zavarivanje [6]

2.2.3. Sapnica za zaštitni plin

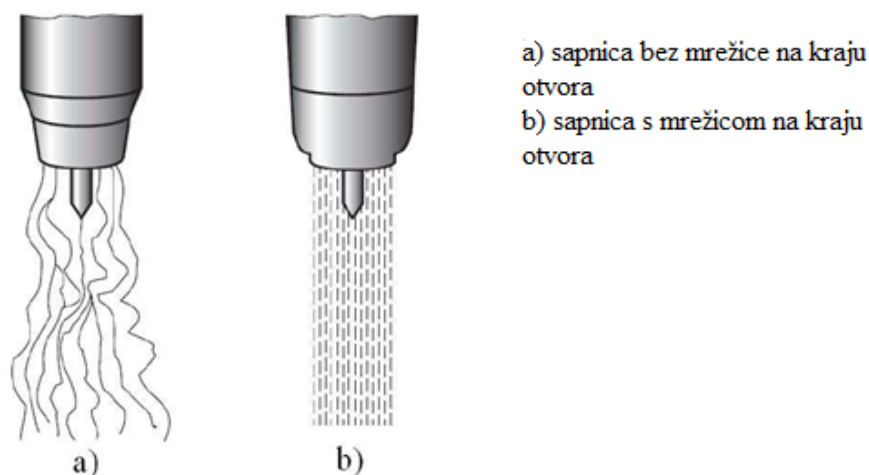
Služi za usmjeravanje plina tokom zavarivanja, a može biti različitih oblika i veličina, ovisno o jakosti struje na mjestu zavarivanja, kao što je prikazano na slici 4.:



Slika 4. Najčešće korištene izvedbe sapnica [7]

Sapnica može biti izrađena od različitih materijala koji su otporni na visoke temperature. Najčešće je izrađena od vatrootpornog minerala, keramike (za manje i srednje jakosti struje zavarivanja) i iz kromiranog bakra hlađena vodom (za veće jakosti struje zavarivanja) [3]. Izbor veličine sapnice se određuje prema promjeru elektrode za zavarivanje, budući da je kod veće jakosti struje zavarivanja potrebna i veća količina zaštitnog plina kao i veći promjer elektrode. Kod elektroda manjeg promjera (do promjera 2,4 mm) odnos promjera elektrode i unutarnjeg promjera sapnice iznosi približno 1:5 – 1:6, dok je kod elektroda većeg promjera taj odnos približno 1:4. [3]

Na kraj otvora sapnice se može staviti mrežica koja poboljšava stabilnost protoka plina i na taj način sprječava turbulencije te je protok zaštitnog plina stabilan i na većim udaljenostima od sapnice do radnog komada, kao što je prikazano na slici 5.



Slika 5. Turbolentno i laminarno strujanje zaštitnog plina [8]

Prednost dugog stabilnog toka zaštitnog plina je činjenica da elektroda može više viriti van iz pištolja te zavarivač ima bolji pregled nad talinom zavora. [8]

2.3. Zaštitni plinovi za TIG zavarivanje

Osnovni zadatak zaštitnog plina je da osigura prikladnu atmosferu, koja se što lakše ionizira te da zaštiti vrh elektrode i talinu od kontaminacije kisikom i drugim plinovima iz okoliša. Izbor zaštitnog plina ovisi o vrsti osnovnog materijala koji se zavaruje.

Utjecaj zaštitnih plinova se održava na [9]:

- električno - fizikalna svojstva,
- metalurške procese u talini zavora,
- tehnološke parametre.

Kod TIG zavarivanja se kao zaštitni plinovi koriste mješavine inertnih plinova do kojih su najčešće korišteni argon i helij.

2.4. Modificirane varijante TIG zavarivanja

Postoje mnogobrojne varijante modificiranog TIG postupka, od kojih se najčešće koriste impulsno zavarivanje, visokoučinsko TIG zavarivanje s aktivirajućim praškom, K-TIG postupak, orbitalno zavarivanje cijevi, zavarivanje s vrućom žicom (TIP-TIG), točkasto zavarivanje i zavarivanje s dvostrukom zaštitom. [10]

2.4.1. Impulsno TIG zavarivanje

Ovakav postupak omogućava optimalno korištenje energije, jer se jačina struje značajno povećava samo u kratkom periodu vremena kada se rastopljeni vrh dodatnog materijala odvaja i prenosi u metalnu kupku. Impulsno TIG zavarivanje je veoma pogodno za automatsko (orbitalno) zavarivanje cijevi. [10]

2.4.2. TIG točkasto zavarivanje

Postupak omogućava dobivanje spoja preklapanjem, bez prethodne perforacije radnih komada. Postupak je veoma jednostavan i ne zahtijeva veliku vještinu operatera, veoma je produktivan te je moguća automatizacija. Postupak je primenljiv na niskolegirane čelike, Al, debljine 0.5 do 2 mm. Vrijeme zavarivanja je 0.5 do 5 s [10].

2.4.3. Orbitalno TIG zavarivanje

Rotaciju oko radnog komada obavlja dio opreme za orbitalno zavarivanje koji nazivamo orbitalnim glavama za zavarivanje. Orbitalna glava za zavarivanje se sastoji od fiksnog dijela koji služi za fiksiranje glave na radni komad i dijela koji rotira i na sebi nosi pištolj za zavarivanje. Na taj način pištolj za zavarivanje može svojom kretnjom opisivati kružnicu oko radnog komada. U praksi se mogu susresti načini zavarivanja koji bi se mogli nazvati orbitalnim zavarivanjem, gdje radni komad rotira dok pištolj miruje što je u suprotnosti s definicijom orbitalnog zavarivanja. Međutim, u ovom slučaju se ipak radi o zavarenom spoju koji čini kružnicu i koji nastaje minimalnom rotacijom od 360°, ali sada radnog komada, a ne pištolja odnosno električnog luka. Pištolj za zavarivanje može se u ovom slučaju postaviti u najpovoljniji položaj glede utjecaja sile gravitacije na talinu zavara i konfiguracije radnog komada. Prednost ovog sistema je u tome što rezultati mogu biti konstantniji i moguće je ostvariti veće brzine zavarivanja, ali je velika mana fleksibilnost primjene [11].



Slika 6. Orbitalno TIG zavarivanje [5]

Oprema za orbitalno zavarivanje sastoji se prvenstveno od izvora struje za zavarivanje (AC i DC) i glave za orbitalno zavarivanje. Jedan od zadataka izvora struje za zavarivanje je kontrola i upravljanje kretanjama glava za orbitalno zavarivanje. Glave mogu biti različitih izvedbi i konstrukcijskih rješenja. Dio opreme za orbitalno zavarivanje svakako mogu biti i razne dodatne naprave.

2.4.4. Visokoučinsko TIG zavarivanje s aktivirajućim praškom

Ova varijanta postupka uspostavljena je s ciljem da se poveća efikasnost penetracije kod procesa TIG zavarivanja. Ova varijanta koristi aktivirajući prašak, a naziv je prema tome dobila od *Active Flux TIG*, A-TIG. A-TIG je proces u kojem je zbog suženja luka i modificiranog tijeka taline penetracija u osnovnom materijalu znatno dublja nego kod konvencionalnog TIG zavarivanja. Kombinacija dublje penetracije i viših brzina zavarivanja povećava efikasnost zavarivačkog procesa.

2.4.5. K-TIG -visoko penetracijski postupak - „keyhole”

K-TIG je automatizirani visokobrzinski, jednoprolazni proces s punom penetracijom koji eliminira potrebu za dodatnim materijalom, pripremom rubova ili vještinama zavarivača. Proizvodi zavare bez greške brzinama većim do 100 puta u odnosu na konvencionalni TIG postupak za materijale debljine do 16 mm. Nema potrebe za naknadnom obradom korijena ili lica zavora, čišćenjem ili brušenjem [12].

K-TIG postupak je jednostavan za uporabu, struktura luka i ključanica se razvijaju spontano i održavaju se automatski kontrolnim sustav kroz proces zavarivanja. Zbog svoje jednostavnosti niski su troškovi održavanja, sustav je robustan i pouzdan.

2.5. TIP TIG postupak zavarivanja

Primjena konvencionalnog TIG postupka zavarivanja ne može se u potpunosti odgovoriti potrebama suvremenog tržišta s aspekta proizvodnosti i ekonomičnosti. Stoga je u tu svrhu udovoljavanja potrebama tržišta 1999. godine inženjer Siegfried Plasch osmislio i patentirao postupak zavarivanja pod nazivom TIG zavarivanje s vođenim dodavanjem vrućeg ili hladnog dodatnog materijala (TIP TIG) [13].

2.5.1. Osnovni koncept postupka

TIP TIG zavarivanje je modernizirana varijanta TIG postupka zavarivanja uz primjenu automatskog dodavanja žice tj. dodatnog materijala koje se sastoji od dvije komponente. Žica za zavarivanje se primarno giba kontinuirano prema naprijed u smjeru zavarivanja te se na to gibanje integrira sekundarno linearno gibanje „naprijed-nazad“ koje proizvodi dodavač žice preko mehaničkog sustava.

Kinetička energija tog dinamičkog gibanja umanjuje utjecaj površinske napetosti taline što omogućava bolje spajanje i miješanje osnovnog i dodatnog materijala, omogućava nečistoćama i plinovima izlaz iz taline te poboljšava žitkost taline što rezultira većim taloženjem dodatnog materijala. Primjenom TIP TIG postupka zavarivanja mogu se vrlo efikasno zavarivati opći konstrukcijski čelici, nehrđajući čelici (feritni, austenitni i austenitno – feritni), visokolegirani čelici, aluminij i njegove legure, titan i slično.

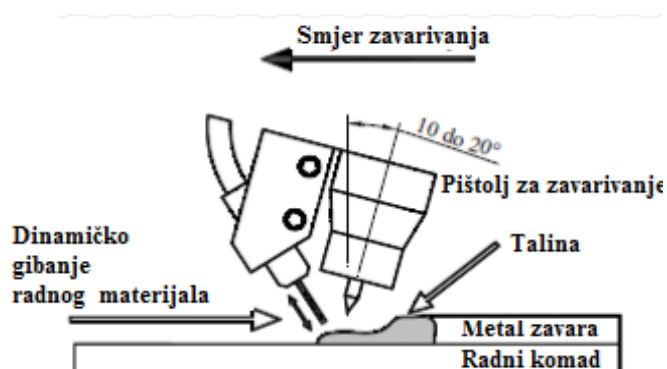
Primjenom TIP TIG postupka dobiva se [14]:

- znatno veći depozit u odnosu na klasični TIG,
- visoku kvalitetu zavara,
- dobar estetski izgled i geometriju zavara bez potrebe za naknadnom obradom,
- smanjeni unos topline u radni komad što rezultira smanjenjem deformacija radnog komada te manji negativni utjecaj na mikrostrukturu.

Osnovne značajke i prednosti TIP TIG postupka zavarivanja u odnosu na konvencionalne postupke zavarivanja su [9]:

- lako se automatizira, a efikasnost mu raste uporabom varijante s vrućom žicom,
- nema prskanja kapljica dodatnog materijala pa nema potrebe za naknadnim čišćenjem i brušenjem što dovodi do smanjenja troškova izrade proizvoda,
- smanjen je fizički i mentalni napor zavarivača,
- nema potrebe za čišćenjem troske,
- veća brzina zavarivanja.

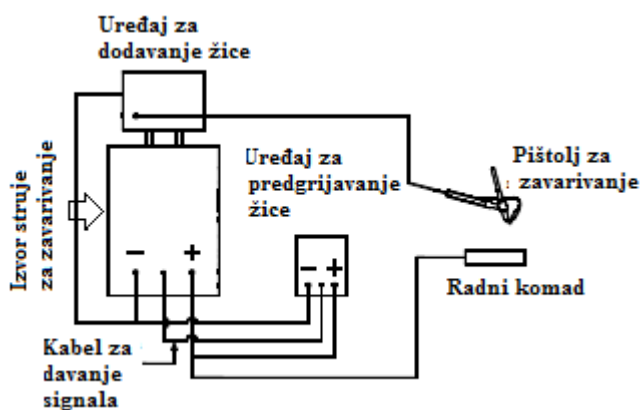
Najčešće primjenjivana tehnika rada kod TIP TIG zavarivanja prikazana je na slici 7.



Slika 7. Koncept i tehnika rada kod TIP TIG zavarivanja [14]

2.5.2. Uređaj za TIP TIG zavarivanje

TIP TIG uređaj za zavarivanje sastoji se od mikroprocesorom upravljanog uređaja za dodavanje dodatnog materijala, izvora struje za predgrijavanje dodatnog materijala, pištolja za zavarivanje s cijevnim paketom i izvora struje za zavarivanje, slika 8.



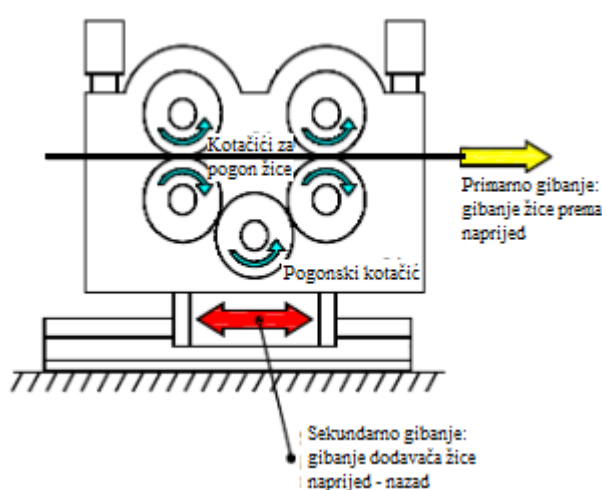
Slika 8. Shematski prikaz spajanja komponenti [14]

2.5.2.1. Uređaj za dodavanje dodatnog materijala

Na slici 9. je prikazan uređaj za dodavanje dodatnog materijala. Unutar samog uređaja za dodavanje dodatnog materijala nalazi se elektronička tiskana ploča s mikroprocesorom koja upravlja dodavanjem dodatnog materijala.



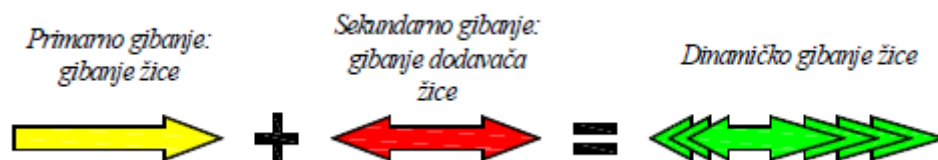
Slika 9. Unutrašnjost dodavača žice, sustav s četiri kotačića [14]



Slika 10. Shematski prikaz gibanja koje ostvaruje dodavač žice [14]

Sustav za dobavu dodatnog materijala sastoji se od četiri kotačića sa zaobljenim utorima (oblik utora ovisi o vrsti dodatnog materijala); ovaj sustav proizvodi dva različita gibanja čiji zbroj daje konačno dinamičko gibanje žice. Unutrašnjost dodavača žice, tj. sustav s četiri kotačića prikazan je na slici 9., a elementarni prikaz gibanja prikazan je slikom 10.

Slika 10. prikazuje dodavač žice, odnosno gibanja koja on proizvodi. Primarno gibanje čini žica svojim kontinuiranim linearnim gibanjem prema naprijed. Primarno gibanje žice odvija se uz pomoć četiri kotačića sa zaobljenim utorima, koji su pogonjeni od strane pogonskog kotačića. Sekundarno gibanje čini dodavač žice svojim oscilatornim gibanjem naprijed-nazad. Parametri svakog od ova dva gibanja (brzina gibanja žice kod primarnog i frekvencija osciliranja kod sekundarnog) mogu se podešavati zasebno tj. neovisno jedno o drugome. Zbroj tih dvaju gibanja daje dinamičko gibanje koje je prikazano slikom 11.



Slika 11. Prikaz dinamičkog gibanja [15]

Ovakvo dinamičko gibanje dodatnog materijala omogućava smanjivanje površinske napetosti taline metala zavora, uslijed čega je moguće izvođenje zavarivanja uz primjenu nižih parametara nego što je to uobičajeno primjenom postupka zavarivanja koji nema dinamičko dodavanje dodatnog materijala. Također se dinamičkim dodavanjem dodatnog materijala postiže veći depozit dodatnog materijala.

Uređaj za dodavanje dodatnog materijala za TIP TIG zavarivanje ima mogućnost podešavanja parametara preko upravljačke ploče kako slijedi [9]:

- brzina dodavanja dodatnog materijala
- frekvencija osciliranja dodatnog materijala
- početna brzina dodatnog materijala
- povrat dodatnog materijala

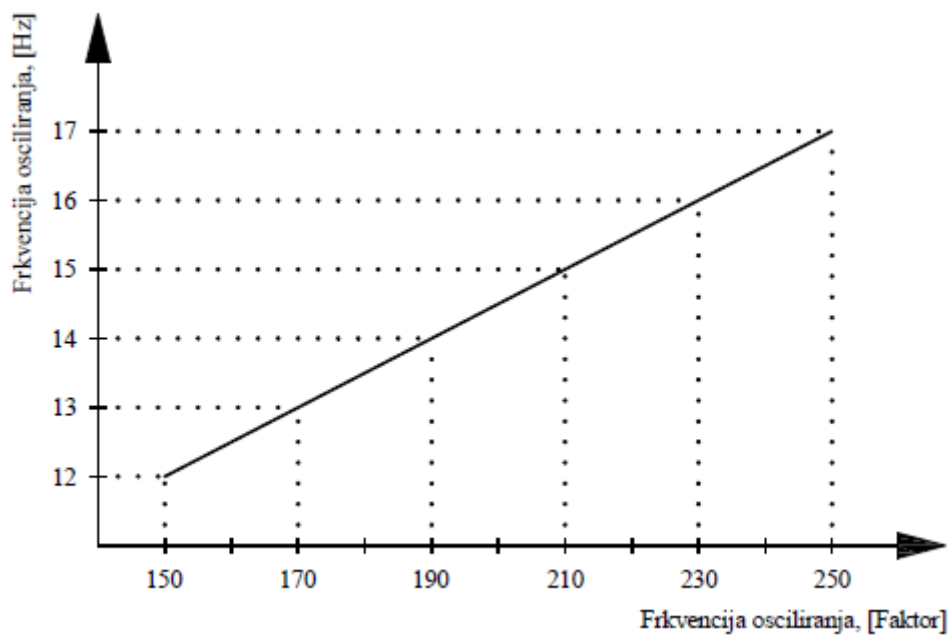
Svaki od navedenih parametara utječe na oblik i geometriju zavora te na stabilnost procesa.

Na upravljačkoj ploči uređaja za dodavanje dodatnog materijala parametar frekvencija osciliranja i parametar brzina dodavanja dodatnog materijala su iskazani pomoću mjerne jedinice faktor. Mjerna jedinica faktor nije standardom prihvaćena mjera pa ju je potrebno preračunati u standardom prihvaćene mjerne jedinice. Preračunavanje mjerne jedinice Hz, za frekvenciju osciliranja dodatnog materijala prikazano je tablicom 1. i grafički slikom 13.

Tablica 1. Tablični prikaz pretvorbe frekvencije osciliranja dodatnog materijala iz mjerne jedinice Faktor u mjernu jedinicu Hz [9]

Frekvencija osciliranja dodatnog materijala, [Faktor]	Frekvencija osciliranja dodatnog materijala, [Hz]
250	17
230	16
210	15
190	14
170	13
150	12

Iz tablice 1. vidljivo je da primjena frekvencije osciliranja dodatnog materijala nije linearna te nije moguće odrediti koeficijent pomoću kojeg se frekvencija osciliranja izražena pomoću mjerne jedinice Faktor preračuna u frekvenciju osciliranja izraženu pomoću mjerne jedinice Hz, no također iz tablice 1. je vidljivo, a i slikom 12. prikazano, da se za svakih 20 Faktora frekvencija osciliranja promijeni za 1 Hz.



Slika 12. Grafički prikaz pretvorbe frekvencije osciliranja dodatnog materijala iz mjerne jedinice Faktor u mjernu jedinicu Hz [9]

2.5.2.2. Izvor struje za predgrijavanje dodatnog materijala

Postoje dvije varijante TIP TIG zavarivanja, zavarivanje s hladnom žicom i zavarivanje s vrućom žicom. Kod zavarivanja s vrućom žicom potrebno je žicu predgrijati na određenu temperaturu, koja ovisi o položaju zavarivanja, pripremi i vrsti osnovnog materijala. Predgrijavanje dodatnog materijala provodi se pomoću posebnog izvora struje, odnosno uređaja za predgrijavanje dodatnog materijala za zavarivanje.

Dodatni materijal zagrijava se primjenom Jouleovog efekta, odnosno Jouleove topline čija se vrijednost izračuna prema sljedećoj formuli:

$$Q_{DM} = I_{DM}^2 \times R_{DM} \times t_z [J] \quad [14]$$

gdje je:

Q_{DM} – toplina dodatnog materijala [J],

I_{DM} – jakost struje predgrijavanja dodatnog materijala [A],

R_{DM} – otpor dodatnog materijala [Ω],

t_z – vrijeme zavarivanja [s].

Predgrijavanje dodatnog materijala provodi se prilikom zatvaranja strujnog kruga između negativnog pola izvora struje predgrijača i radnog komada, pri čemu je pozitivni pol predgrijača spojen preko stezaljke na radni komad.

2.5.3. TIP TIG zavarivanje s hladnom žicom

Ovaj proces je jednostavnija varijanta TIP TIG postupka. Efikasnost i brzina postupka je manja u odnosu na varijantu koja koristi predgrijavanje žice jer je količina unešene topline u zavareni spoj niža.

Primjenom TIP TIG postupka zavarivanja s hladnom žicom dobiva se zavar izvrsne kvalitete i izgleda koji posjeduje izvrsna mehanička i metalurška svojstva, a također smanjeni su troškovi jer nema potrebe za naknadnom obradom spoja. Također je potrebno napomenuti da se primjenom ove varijante postupka mogu ostvariti brzine zavarivanja kao i primjenom impulsnog MIG zavarivanja, ali i veća produktivnost od impulsnog MIG-a u težim položajima zavarivanja [9].

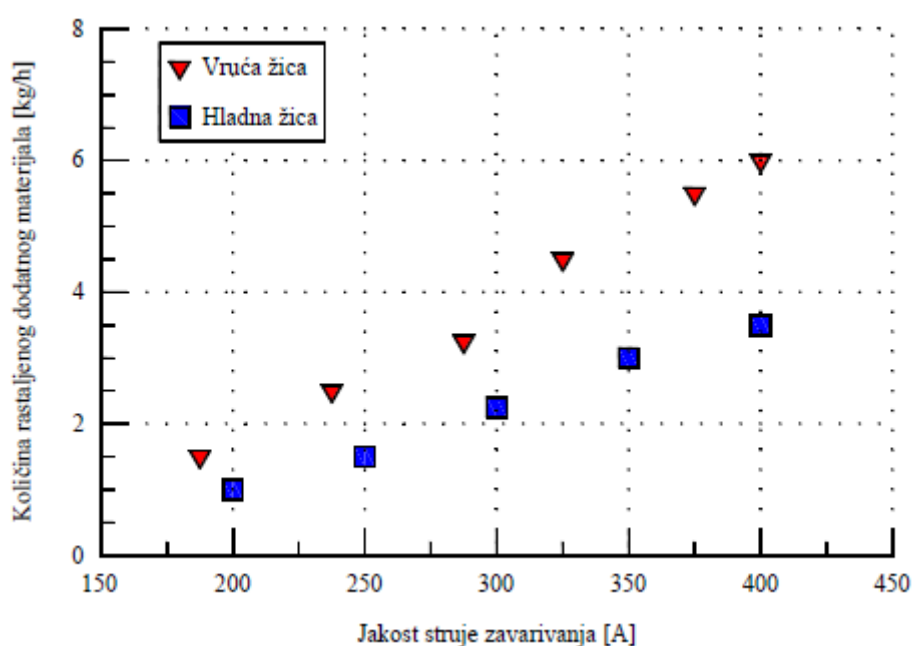
2.5.4. TIP TIG postupak zavarivanja s vrućom žicom

Osnovna razlika između TIP TIG postupka zavarivanja s vrućom žicom i TIP TIG postupka zavarivanja s hladnom žicom jest u predgrijavanju žice tj. dodatnog materijala. Žica se predgrijava efektom nastanka Jouleove topline, odnosno prolaskom električne struje, koju proizvodi dopunski izvor struje, kroz dodatni materijal. Predgrijavanjem se dodatnom materijalu povisuje temperatura pa je za njegovo taljenje potrebna manja energija električnog luka.

Temeljna prednost ovog postupka u odnosu na druge postupke zavarivanja s taljivom elektrodom jest mogućnost odvojenog upravljanja unosom energije i unosom dodatnog materijala u talinu zavora. Ova prednost se u praksi najviše očituje u potpunoj kontroli početne i završne faze zavarivanja.

Također bitne karakteristike ovog postupka su [14]:

- velika količina nataljenog materijala do 4,5 kg/h,
- relativno niži unos topline uslijed čega dobivamo usku zonu ZUT-a,
- minimalne deformacije radnog komada i minimalno gubljenje legirnih elemenata uslijed niskog unosa topline,
- mogućnost primjene tehnologije uskog žlijeba i za veće debljine stijenki,
- odlični rezultati zavarivanja u svim položajima.



Slika 13. Usporedba količine nataljenog dodatnog materijala pri TIG zavarivanju s hladnom i vrućom žicom; promjer žice 1,6 mm, horizontalan položaj (PA) [16]

Kako je na slici 13. prikazano upotrebom TIG zavarivanja s vrućom žicom, u odnosu na hladnu žicu, količina nataljenog dodatnog materijala povećava za 50 do 100%. Količina rastaljenog materijala kod zavarivanja s hladnom žicom, pri određenoj jakosti struje zavarivanja i određenoj brzini dobave žice, je konstantna, dok se kod zavarivanja s vrućom žicom količina nataljenog materijala može mijenjati promjenom jakosti struje predgrijavanja žice.

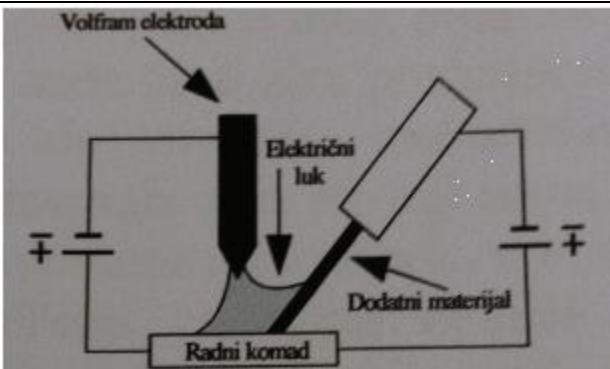
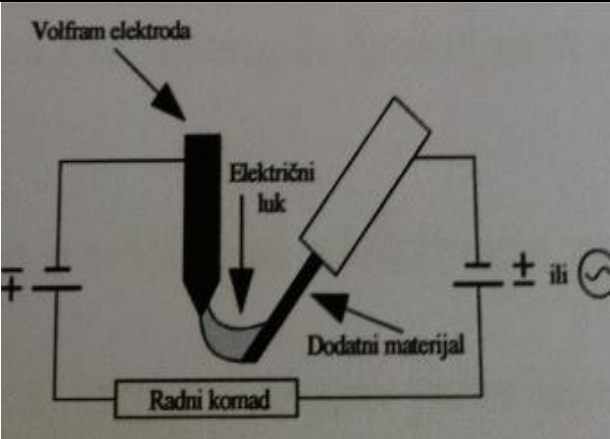
Tablica 2. Usporedba mogućnosti i značajki TIP TIG postupka s vrućom živcom u odnosu na srodne postupke zavarivanja [16]

POSTUPAK	Impulsni MIG	TIG	TIP TIG s hladnom žicom	TIP TIG s vrućom žicom
Primjenivo na materijale	Čelici CrNi, AL	Svi zavarljivi metali	Svi zavarljivi metali	Svi zavarljivi metali osim Al
Debljine materijala koje se mogu zavarivati	>0,6 mm	>0,25mm	>0,25mm	>10mm
Relativna brzina rada	Brzo	Sporo	Brzo	Brzo
Depozicija materijala	1-3,6 kg/h	0,4-0,7 kg/h	1-3,6 kg/h	1,4.5,4
Potrebni nivo vještina i uvježbanosti	Niski	Visoki	Niski	Niski
Relativni operativni troškovi	Niski	Visoki	Niski	Niski
Naknadni radovi na zavaru	Visoki	Niski	Niski	Niski

2.5.5. Problemi koji se javljaju prilikom TIG zavarivanja s vrućom žicom

Prilikom TIG zavarivanja s vrućom žicom može doći do pojave određenih problema koji dovode do nestabilnosti procesa. Jedan od najčešćih problema koji se javlja je skretanje električnog luka prema vrućoj žici ili njegovo skretanje u smjeru suprotnom od vruće žice usljed djelovanja elektromagnetskih sila između struje električnog luka i struje predgrijavanja dodatnog materijala. Ovakav fenomen se naziva magnetsko puhanje električnog luka i štetno djeluje na usmjerenost električnog luka, a za posljedicu ima destabilizaciju procesa zavarivanja. Sljedeći problem koji se najčešće pojavljuje je problem proboja električnog luka s volfram elektrode na dodatni materijal.

Tablica 3. Problemi koji se javljaju kod TIG zavarivanja vrućom žicom [17]

Tip problema	Uzrok	Posljedica
Magnetsko puhanje električnog luka		"Bježanje" električnog luka u magnetskom polju.
Proboj električnog luka s volfram elektrode na dodatni materijal		Dodatni materijal nije u dodiru s radnim komadom

2.5.6. Analiza unosa topline

Unos topline Q kod TIG zavarivanja vrućom žicom može se analizirati kao zajednički unos topline električnog luka i topline dobivene predgrijavanjem na vrućoj žici:

$$Q = Q_{EL} + Q_{DM} \quad [14]$$

gdje je:

Q – ukupna toplina [kJ/mm],

Q_{EL} – toplina električnog luka [kJ/mm],

Q_{DM} – toplina dodatnog materijala, tj. toplina predgrijane žice [kJ/mm].

Za izračunavanje topline električnog luka Q_{EL} koristi se sljedeća formula:

$$Q_{EL} = \frac{I_z \times U}{v_z \times 1000} \times 60 \times \eta \quad [14]$$

gdje je:

Q_{EL} – toplina električnog luka [kJ/mm],

I_z – jakost struje zavarivanja [A],

U – napon električnog luka [V],

v_z – brzina zavarivanja [mm/min],

η – stupanj iskoristivosti električnog luka prema HRN EN – 1011-1.1998.

3. Primjeri primjene TIP TIG postupka u praksi

- Proizvodnja hidrauličkih cilindara



Slika 14. Proizvodnja hidrauličkih cilindara, Češka republika [24]

Materijal: konstrukcijski čelik

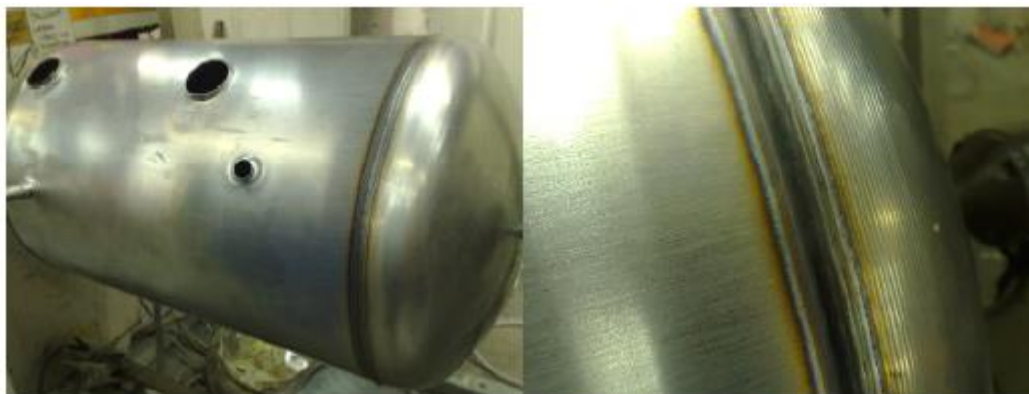
Struja zavarivanja: 260 A

Debljina lima: 5 mm

Promjer žice: 1 mm

Vrijeme zavarivanja: 15 s

- Proizvodnja kotlova



Slika 15. Proizvodnja kotlova, Velika Britanija [24]

Materijal: duplex

Struja zavarivanja: 190 A

Debljina lima: 1,2 mm

Promjer žice: 1 mm

Brzina zavarivanja: 870 mm/min

- Produvodnja tlačnih posuda



Slika 16. Produvodnja tlačnih posuda, Njemačka [24]

Materijal: konstrukcijski čelik

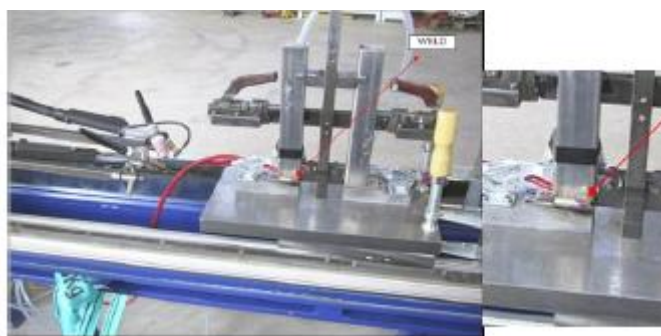
Struja zavarivanja: 190 A

Debljina lima: 1,5 mm

Promjer žice: 1 mm

Brzina zavarivanja: 450 mm/min

- Produodi za prehrambenu industriju



Slika 17. Produodi za prehrambenu industriju, Njemačka [24]

Materijal: nehrđajući čelik

Struja zavarivanja: 220 A

Debljina lima: 2,5 mm

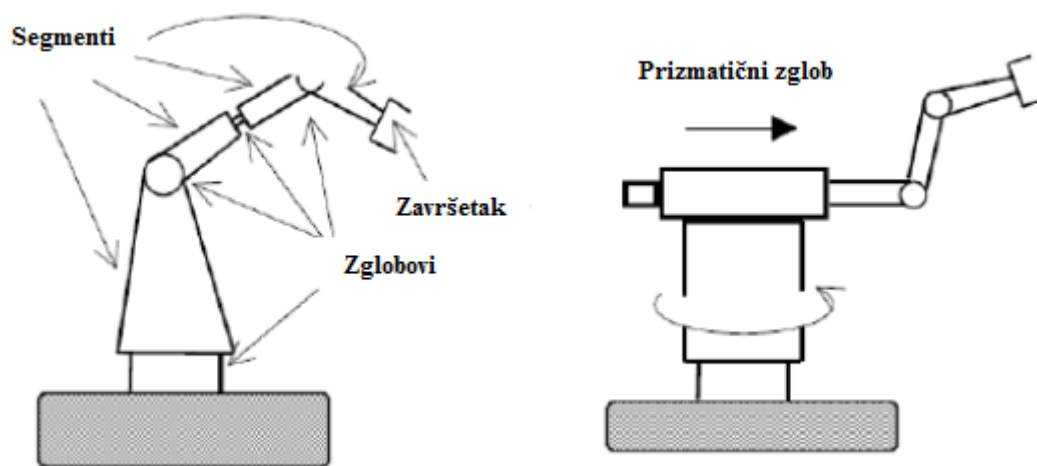
Promjer žice: 1 mm

Brzina zavarivanja: 450 mm/min

4. Industrijske robotske stanice u zavarivanju

4.1. Općenito o industrijskim robotima

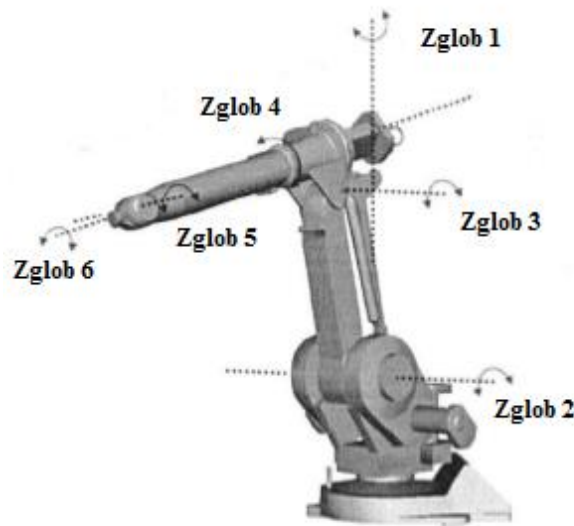
Industrijski robot se sastoji od čvrstih segmenata koji su međusobno povezani zglobovima. Uloga zglobova je također da omogućuju relativno gibanje susjednih segmenata te su obično opremljeni odgovarajućim senzorima kako bi se mogao izmjeriti njihov relativan položaj. Ukoliko je riječ o rotacijskim zglobovima tada odklon u položaju predstavlja kut zgloba, s druge strane robot može imati i translacijske odnosno prizmatične zglobove kako je vidljivo sa slike 18.



Slika 18. Shematski prikaz segmenata i zglobova robotskom manipulatoru [18]

Broj stupnjeva slobode gibanja robotskog manipulatora je broj nezavisnih varijabli pozicije koje moraju biti određene kako bi bio poznat položaj svih dijelova mehanizma. S obzirom da je robot najčešće kinematski lanac, svakom zglobu je dodijeljena jedna varijabla, što implicira da je broj stupnjeva slobode gibanja jednak broju zglobova.

Na završni dio kinematskog lanca postavlja se alat koji odgovara primjeni industrijskog robota. Položaj manipulatora izražava se upravo preko položaja završnog sklopa s alatom, točnije preko relativnog položaja koordinatnog sustava TCP-a (Tool Center Point) ili središnje točke alata s obzirom na referentni koordinatni sustav nepokretnog temelja robota. Na slici 19., shematskim 3D prikazom predstavljen je industrijski robot sa šest stupnjeva slobode gibanja i sfernom strukturom, što znači da su mu svi zglobovi rotacijski [18].



Slika 19. 3D shematski prikaz industrijskog robota sa 6 stupnjeva slobode gibanja [19]

Roboti se mogu podijeliti u tri generacije [20]:

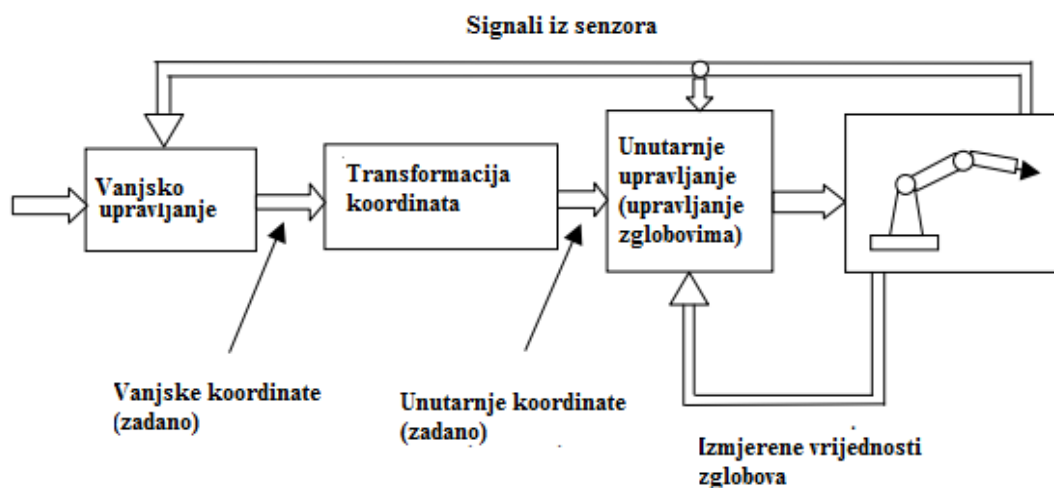
- Prva generacija robota naziva se programirani roboti. Roboti bez osjetila i s vrlo ograničenom inteligencijom.
- Druga generacija robota (senzitivni roboti) opremljena je nizom senzora (vizualni, taktilni, senzor sile), a mogu imati i sustave za raspoznavanje.
- Treća generacija robota opremljena je, osim sustavima za raspoznavanje i računalima nove generacije pomoću kojih je moguće vršiti vođenje multivarijabilnog procesa s više ilaznih i ulaznih varijabli.

Osnovne komponente industrijskog robota su [20]:

- Mehanička struktura ili manipulator koji se sastoji od niza krutih segmenata povezanih pomoću zglobova.
- Aktuatori (pogoni) postavljaju manipulator u određeno kretanje pomicanjem zglobova. Najčešće se upotrebljavaju električni i hidraulički motori, a ponekad i pneumatski.
- Sustav upravljanja (računalo) omogućuje upravljanje i nadzor kretanja manipulatora.

Generalno se može reći da se robot sastoji od nekoliko temeljnih sustava, a to su [18]:

- **Sustav programiranja** kod kojeg operater mora postupkom programiranja „naučiti“ robota da obavi specifičnu zadaću. Kod „teach in“ metode, pomoću privjeska za učenje robotom se upravlja do određenih prostornih točaka koje se spremaju u memoriju zajedno s ostalim procesnim parametrima. Za programiranje kompleksnih zadataka ovom metodom potrebno je mnogo vremena, a robot je pri tome izdvojen iz proizvodnje, što nije poželjno. Kod „off-line“ metode koriste se odgovarajući računalni software-i pri čemu fizički pristup robotu nije potreban i ne mora se izdvajati iz proizvodnog procesa.
- **Upravljački sustav** jednostavnog industrijskog robota interpretira i prerađuje zadani program te generira vrijednosti zglobnih kuteva, brzina i ubrzanja, ali i drugih signala, ovisno o vrsti robota i primjeni te posredstvom energetskog i mehaničkog sustava „tijelo“ robota izvršava zadaću, a izlazne vrijednosti koje bilježi mjerni sustav se u sklopu povratne veze vraćaju u upravljačku jedinicu, s tim da je danas u primjeni pretežno prisutno nezavisno, interno upravljanje zglobovima, slika 20.



Slika 20. Pojednostavljeni primjer upravljanja industrijskim robotom [18]

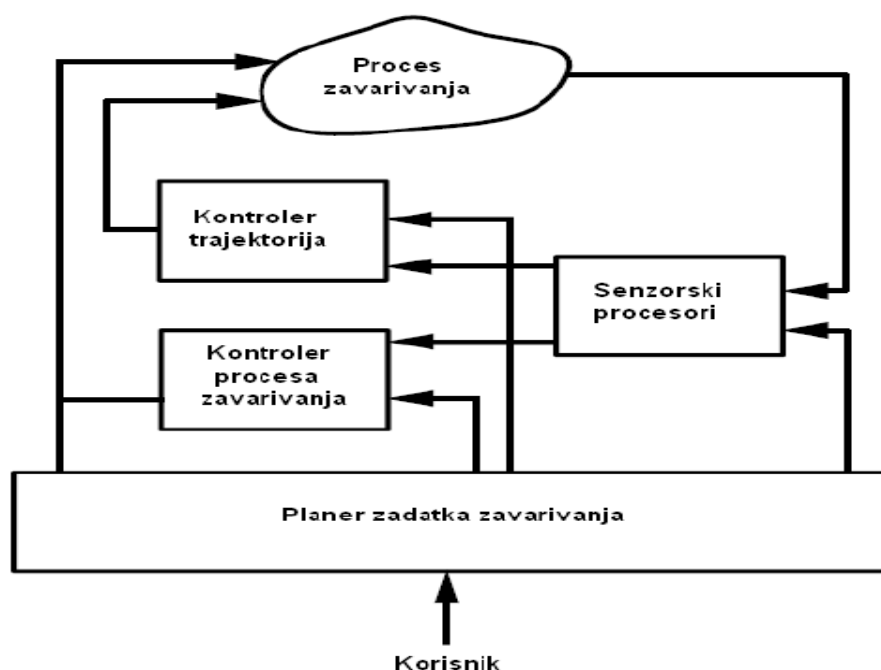
- **Energetski sustav** odnosi se na vrstu pogona koji se koriste za pokretanje robota. Pogoni mogu biti hidraulični, pneumatski, hidropneumatski i električni.
- **Mehanički sustav** robota sačinjavaju sve mehaničke komponente od kojih je izgrađen poput: segmenata, uležištenja, osovina, vratila, prijenosnika gibanja, momenata i slično.

- **Mjerni (senzorski) sustav** se dijeli na senzore unutarnjeg stanja i senzore vanjskog stanja. Senzori unutarnjeg stanja služe za mjerenje položaja, brzine te sile, odnosno ubrzanja. Senzori vanjskog stanja najviše ovise o specifičnoj primjeni robota i mogu biti različiti: mehanička ticala, matrični senzori dodira, ultrazvučni, infracrveni, vizualni senzori, itd.

4.2. Programiranje robota za zavarivanje

Ovaj se proces najčešće naziva "učenje" robota. Robot za zavarivanje je potrebno isprogramirati za obavljanje često složenih i teških zadataka zavarivanja gdje su putanje robota u pravilu vrlo nelinearne. Razlikujemo dva ključna pojma: putanja i trajektorija. Pod pojmom putanja se podrazumijeva krivulja koja dovoljno točno definira prostorne pozicije i orijentacije alata. Trajektorija definira promjene brzine i ubrzanja duž putanje zavarivanja. Kretanje vrha alata može biti od točke do točke ili kontinuirano, po linearnoj ili kružnoj putanji.

Da bi robotizirani postupak zavarivanja bio kvalitetan, nužno je da se robot može prilagoditi određenim promjenama u uvjetima i okolini zavarivanja te izvršiti odgovarajuću reakciju u vidu korekcije gibanja ili čak parametara procesa, a to se postiže adaptivnim upravljanjem procesa. Struktura adaptivne kontrole temelji se na modulima koji imaju određene zadaće i koji međusobno komuniciraju, slika 21.



Slika 21. Modularna arhitektura adaptivnog upravljanja robotiziranim procesom zavarivanja [21]

U svijetu industrijskih robota danas postoje tri vodeća načina programiranja robota: Off-line, On-line, i hibridno (miješano) programiranje, kao kombinacija prije navedenih.

4.2.1. On-line metoda programiranja

On-line metoda programiranja provodi se na radnom položaju robota te ga je u skladu s tim potrebno isključiti iz proizvodnje. Glavna vrsta on-line programiranja je tzv. „teach in“ programiranje, a dijeli se na izravno i neizravno.

Izravno učenje odvija se na način da operater ručno vodi robota po putanji pri čemu se ključne točke, odnosno pozicije, spremaju u memoriju, što omogućuje robotu da kasnije ponovi gibanje. Ovaj način programiranja je zastario i stoga se danas vrlo rijetko koristi u industriji, pa tako i u okviru tehnologije zavarivanja. Kod neizravnog operater koristeći tipke na upravljačkoj ploči vodi robota po željenoj putanji spremajući u memoriju pozicije, ali i druge procesne parametre poput napona, jakosti struje, brzine zavarivanja i slično. Već dvije spremljene točke predstavljaju program. Nakon izvršenog učenja provodi se testiranje programa s ciljem provjere da li će robot dosljedno interpretirati i izvršiti zadani program.

Prednost ove metode programiranja jest da nije potrebna dodatna nabavka softvera i hardvera, lako se uči pa nije potreban visoko obrazovani kadar ljudi. S druge strane, mane su mu da za vrijeme programiranja robot ne može obavljati proizvodnu funkciju. Uzme li se u obzir da u pogonu zna biti i više robota to je jako dugotrajna metoda.

4.2.2. Off-line metoda programiranja

Riječ je o programiranju koje se vrši na računalu i ne zahtijeva fizičko kretanje robota koji se stoga ne izdvaja iz proizvodnog procesa, što je ekonomski pogodno i predstavlja temeljnu prednost u odnosu na „teach in“ programiranje. Smisao off-line programiranja je u projektiranju što većeg broja tehnoloških procesa na zasebnom radnom mjestu, neovisno o robotu i u što kraćem roku.

Današnji programski paketi za off-line programiranje povezuju konstruiranje proizvoda s projektiranjem pojedinačnih robotskih stanica, robotiziranih sustava i simulacijom proizvodnog procesa. Kod projektiranja tehnologije zavarivanja, grafičkom simulacijom u takvim paketima se generira „kod“ programa za robota.

4.2.3. Hibridna (mješovita) metoda programiranja

Osnovno svojstvo ove metode programiranja jest da se dio programa vezan uz skup točaka u prostoru, odnosno putanje pištolja, zadaje on-line metodom, čime se implementiraju neke od prednosti te metode programiranja kao što su zadavanje točki pozicija relativno s obzirom na izradak pod vizualnim promatranjem operatera u realnom prostoru, kao i kolizijska provjera na samom mjestu. Dok se dio programa vezan uz operacijski tok, odnosno značajke zavarivanja, provodi off-line čime se ostvaruju određene uštede jer, iako je ukupno trajanje programiranja nešto duže nego što bi to bio slučaj kod cjelovitog on-line programiranja, vremenski dio koji otpada na on-line fazu je opet kraći od trajanja potpune on-line metode, što jasno sugerira da je pri tome robot manje vremena izdvojen iz proizvodnje te su manji ekonomski gubici. Dakle, u okviru on-line dijela pomoću upravljačke konzole robot se vodi po stazi i memoriraju se točke položaja. U off-line dijelu se, uz zapamćene točke pozicija, izrađuje program za zavarivanje.

4.3. Primjena senzora kod robotiziranog zavarivanja

Senzori su uređaji za mjerenje određenih parametara u okolini robota koji posredstvom povratne veze u sklopu upravljačke strukture omogućavaju robotu da se adaptira odnosno prilagodi novonastalim uvjetima. Kod robotiziranog zavarivanja se prema tome primjenjuju senzori za mjerenje parametara svojstvenih tehnologiji zavarivanja kako bi se mogao postići proces koji odgovara traženim zahtjevima u okviru WPS-a (Welding Procedure Specification) i u skladu s time kvalitetan zavareni spoj.

Primjena senzora paralelna je zahtjevima za točnošću procesa. Drugim riječima, ako se proces zavarivanja može održavati kvalitetnim i produktivnim uz manju primjenu senzora i jednostavniju upravljačku strukturu te ako se uzme u obzir i skupocjenost pojedinih senzora, tada će to biti optimalno rješenje. TIG postupak zavarivanja se najčešće robotizira iz više razloga: zbog svestranosti primjene u industriji, pogodnosti opreme za robotizaciju, ali i zbog ekonomskih razloga po pitanju primjene senzora. Naglasak na senzorskom sustavu je i kod zavarivanja s velikim brzinama, a veća se točnost procesa općenito traži kod izradaka manjih dimenzija i s uskim tolerancijama, što je posebno izraženo kod robotiziranog laserskog zavarivanja.

Generalno se senzori kod robota za zavarivanje mogu podijeliti na senzore za tehnološke parametre i senzore za praćenje žlijeba i zavarenog spoja.

Senzori prve skupine mjere tehnološke parametre procesa zavarivanja važne za njegovu stabilnost i koriste se za svrhe praćenja i kontrole. Senzori druge skupine se uglavnom primjenjuju za traženje žlijeba i praćenje linije zavarivanja te omogućuju robotu da korigira putanju ukoliko se jave geometrijska odstupanja, ali i za praćenje slobodnog kraja žice, taline te skrutnutog zavora.

4.3.1. Senzori za mjerenje tehnoloških parametara [22]

- **Mjerenje napona** – u pravilu vršiti što je moguće bliže električnom luku. Struja preko kontaktne cjevčice ulazi u elektrodu odnosno žicu, ali i u razmaku od kontaktnog dijela, pa do vrha žice javlja se pad napona od, otprilike, 0,3 V, ovisno o karakteristikama procesa.
- **Mjerenje jakosti struje** – za takvo mjerenje se koriste dvije vrste senzora za mjerenje jakosti struje, a to su senzor na principu Hallovoeg efekta, koji se sastoji od željezne jezgre kroz koju prolazi vodič sa strujom te shunt, gdje struja prolazi kroz statički otpornik pri čemu se mjeri vrijednost napona iz kojeg se potom izvodi jakost struje.
- **Mjerenje brzine dovođenja žice** - Iako se za definiranje procesa obično zadaju parametri napona i jakosti struje, u stvarnim uvjetima jakost struje je posljedica određene brzine dovođenja žice. Porastom brzine dovođenja žice raste jakost struje i dolazi do bržeg trošenja elektrode, smanjenjem brzine dovođenja opada jakost struje, a s njome i brzina taljenja elektrode.

Senzori za mjerenje napona i brzine dovođenja žice odnose se na MIG postupak.

4.3.2. Senzori za praćenje žlijeba i putanje zavarivanja

Ovi senzori služe robotu u svrhu traženja i praćenja žlijeba te putanje zavarivanja za vrijeme procesa zavarivanja.

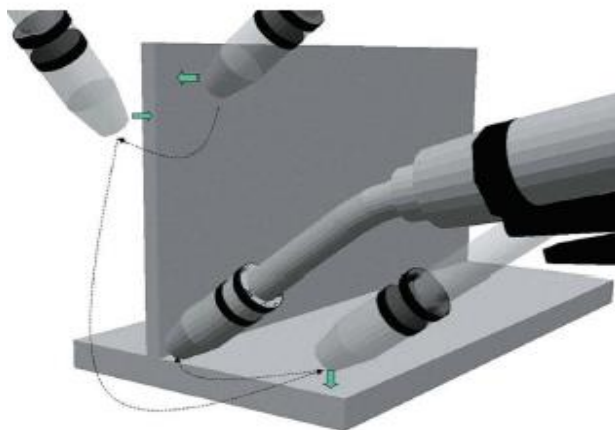
4.3.2.1. Mehanički senzori

Ova vrsta senzora koristi igličaste, kuglaste ili valjkaste senzore za detekciju radne površine i poziciju pripreme zavora. Nedostatak im je što se mogu primijeniti samo kod priprema zavora većih dimenzija i ograničeni su na detekciju samo ravnih zavora.

4.3.2.2. Električni senzori

Električni senzori uz pomoć dodatnog napajanja spojenog na metalnu sapnicu i taljivu elektrodu pomiču se do radnog komada sve do trenutka kada ga dodirnu.

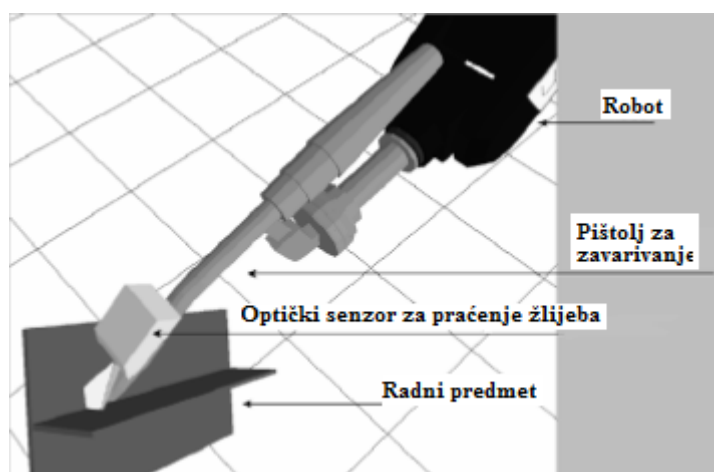
U trenutku kada sapnica ili elektroda dođe u kontakt s radnim komadom električni krug se zatvara u točki dodira kratkog spoja, a signal se proslijeđuje do kontrolne kutije koja određuje točnu koordinatu gdje je nastao kratki spoj, slika 22.



Slika 22. Način detekcije radnog komada uz pomoć kontaktnog električnog senzora [23]

4.3.2.3. Optički senzori

Optički senzori prate žlijeb tijekom procesa zavarivanja projiciranjem i cikličkim njihanjem laserskog snopa, u ravnini okomitoj na liniju zavora i os skeniranja, koji se reflektira prema CCD kameri. Primljeni analogni signali se pretvaraju u digitalne iz kojih se potom definiraju geometrijske značajke spoja te se vrši potrebno korigiranje položaja i orijentacije. Senzor je spojen tako da se nalazi na prednjem dijelu pištolja i skenira područje ispred samog električnog luka.



Slika 23. Grafički model robota s optičkim senzorom za praćenje žlijeba [22]

Za vrijeme procesa zavarivanja optički senzor vrši triangulacijsko skeniranje u ravnini okomitoj na liniji zavarivanja i na taj način dobiva 2D sliku geometrije žlijeba u obliku mreže 2D koordinata.

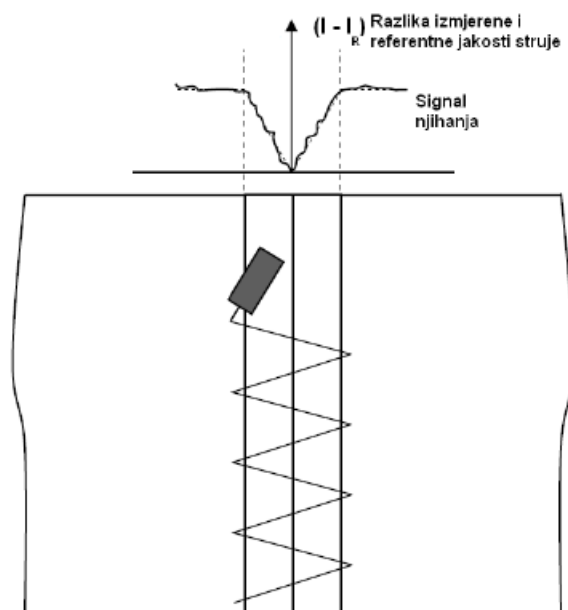
Optički senzor za praćenje žlijeba obično u potpunosti kompenzira izmjerene greške u položaju. Ispravljanje se uglavnom odvija pri zavarivanju po zadanoj, nominalnoj putanji pri čemu robot samo korigira greške u položaju, točnije robotski kontroler prima podatke o novim položajima od senzora i modificira putanju mijenjajući koordinate TCP-a uz zadržavanje iste orijentacije. U ovom slučaju problemi vezani uz ograničenja zglobova, singularnosti i eventualne kolizije, ali nedostatak leži u činjenici da korisnik mora programirati putanju. Nasuprot tome, ako se robotu ispostave samo početna i završna točka, prisiljen je stvarati putanju samo na osnovi informacija iz senzora, što zahtijeva modifikacije položaja, ali i orijentacije, pa su prisutne opasnosti od dinamički singularnih područja, ograničenja zglobova i mogućih kolizija s predmetima iz okoline.

Ipak, primjenom odgovarajućeg filtriranja te generiranjem polinomnog i vektorskog opisa putanja zavarivanja praćenje nenominalne, kompleksne trajektorije je izvedivo.

4.3.2.4. Električni luk kao senzor

Na ideju električnog luka kao senzora došlo se još 1980. godine. Bit je da se njihanjem odnosno variranjem udaljenosti između vrha žice i predmeta praktično iskoriste izmjerene promjene jakosti struje koje posljedično nastaju.

Praktična korist pronašla se upravo u praćenju linije zavarivanja. Pojednostavljeno rečeno, ako nema devijacije praćenog žlijeba od pretpostavljene putanje u okviru procesa zavarivanja, tada izmjerena jakost struje u središnjoj točki njihanja mora biti jednaka nominalnoj (referentnoj), odnosno jakosti struje kod savršeno centriranog pištolja u odnosu na žlijeb, dakle razlika tih dviju jakosti mora biti jednaka nuli, slika 24. U slučaju pojave devijacije, središnja linija ili os njihanja se više ne poklapa sa središnjom osi spoja, što znači da se u točki na osi njihanja smanjila udaljenost vrha žice od izratka i ujedno povećala jakost struje koja je sada veća od referentne. I ostalim točkama na krivulji njihanja se pri tome promijenila vrijednost jakosti struje i ne odgovara onima u slučaju centriranog položaja. Na osnovi ovih informacija generira se novi položaj i šalje robotskom kontroleru koji korigira gibanje i kompenzira devijaciju.



Slika 24. Shematski prikaz procesa zavarivanja kod kojeg nema devijacije žlijeba [22]

Za usporedbu električni luk ima znatno manju točnost kod praćenja, a razlog tome leži i u signalnoj buci koju proizvode uvjeti koji su prisutni u samome luku. Isto tako, „vidno polje“ mu je ograničeno njihanjem i ne može izvršavati funkcije traženja žlijeba na razini na kojoj to obavlja optički senzor, no s druge strane je svojstva poput praktičnosti, jednostavnije opreme, neopterećivanja pištolja, niske cijene u kombinaciji s širokom primjenom, stavljaju veliki naglasak na postojeću vrijednost, ali i potencijal ovog jednostavnog senzora [22].

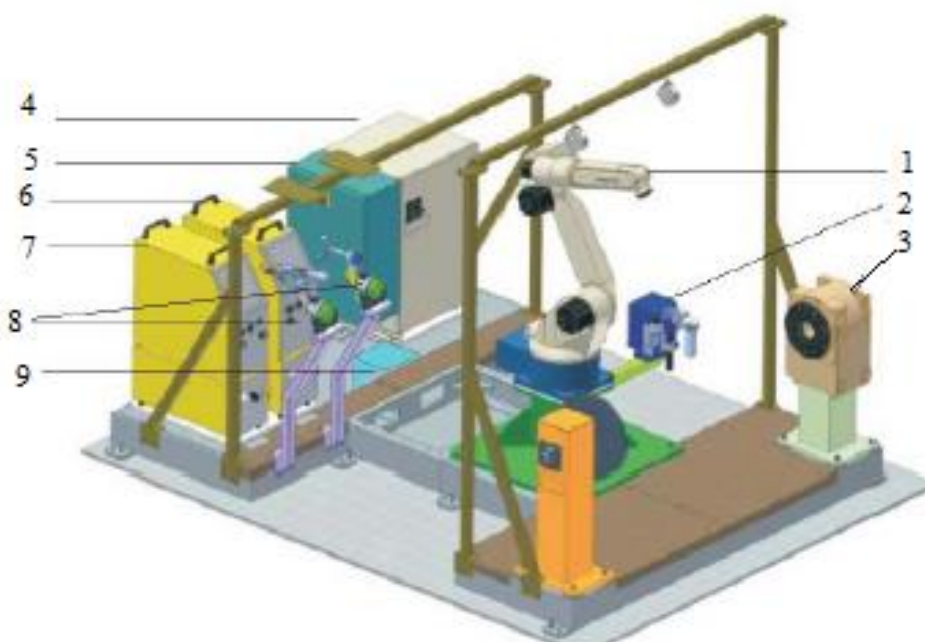
5. Eksperimentalni dio

Eksperimentalni rad izvršen je u Laboratoriju za Zavarivanje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu, na robotskoj stanici s robotom OTC Almega AX-V6. U eksperimentalnom dijelu su ispitivane zavarivačke mogućnosti robota kod TIG zavarivanja, odnosno navarivanja bez upotrebe dodatnog materijala.

5.1. Robotska stanica VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm

Robotska stanica, prikazana slikom 25., sastoji se od:

1. robota OTC Almega AX-V6,
2. uređaja za čišćenje sapnice, rezanje žice i nanošenja sredstva protiv naljepljivanja kapljica
3. pozicionera P250V ROBO,
4. električne jedinice,
5. upravljačke jedinice,
6. izvora struje MIG/MAG VPS 4000,
7. izvora struje TIG VARTIG 3500 DC/AC,
8. sustava za automatsku izmjenu pištolja,
9. senzora električnog luka AX-AR.



Slika 25. 3D model robotske stanice s robotom OTC Almega AX-V6 [25]

Također, u sustav je ugrađen i tzv. „shock“ senzor koji reagira u slučaju kolizije glave za zavarivanje i radnog komada, naprave i sl.

On-line programiranje se provodi pomoću privjeska za učenje pri čemu treba napomenuti da je programski paket kompatibilan s Windows OS sustavima što olakšava pohranjivanje podataka i povezivanje u mrežne sustave. Podešavanje parametara zavarivanja provodi se preko privjeska za učenje (slika 26.) tako da nisu potrebne dodatne aktivnosti za podešavanje na samim izvorima struje za zavarivanje.



Slika 26. Privjesak za učenje

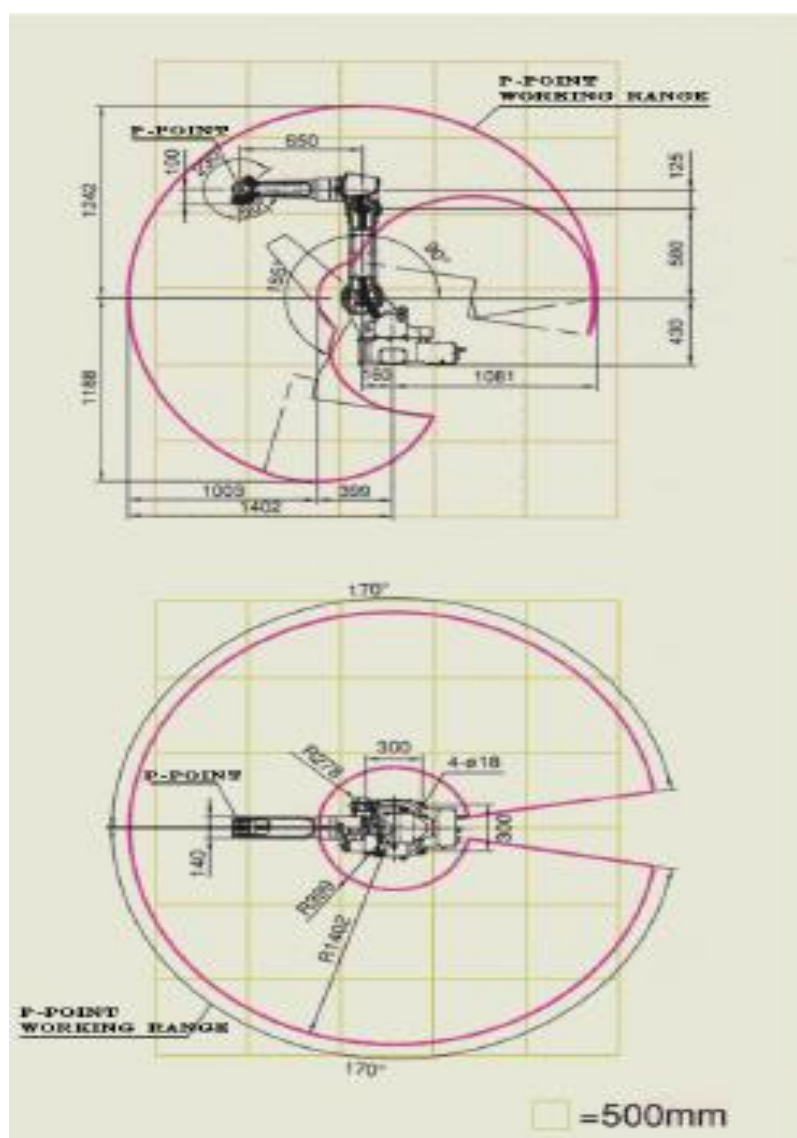
5.1.1. Mehanički sustav robota Almega AX-V6

Na slici 27. prikazan je robot OTC Almega AX-V6.



Slika 27. Robot OTC Almega AX-V6

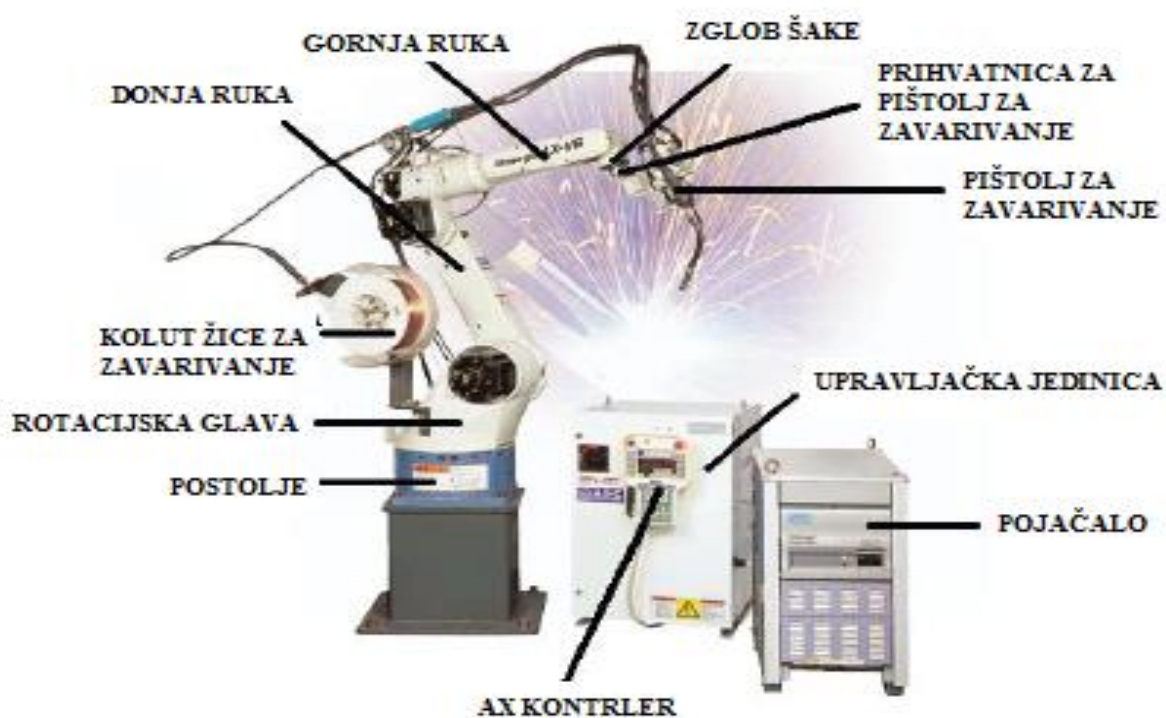
Kinematička struktura robota AX-V6 je određena je sa 6 rotacijskih stupnjeva slobode gibanja. Takvom kinematičkom strukturom moguće je postići potpuno pozicioniranje i orijentaciju pištolja za zavarivanje ili prihvatnice za pozicioniranje unutar radnog prostora koji je prikazan na slici 28.



Slika 28. Radni prostor robota AX-V6 [25]

Robot Almega AX-V6 sastoji se od sljedećih komponenti, prikazanih na slici 29:

- postolje,
- rotacijska glava,
- donja ruka,
- gornja ruka,
- zglob šake,
- upravljačka jedinica,
- AX/AX-C kontroler za ručno upravljanje,
- pojačalo,
- posebna, dodatna oprema (prihvatnica za pištolj za zavarivanje, pištolj za zavarivanje, kolut žice za zavarivanje)



Slika 29. Struktura robota AX-V6 [25]

Tablica 4. Tehničke karakteristike robota [25]:

Naziv robota		Almega AX-V6
Operacijski način rada		Vertikalno artikularan
Broj stupnjeva slobode gibanja		6
Maksimalna opteretivost		6 kg
Ponovljivost		$\pm 0,08$ mm
Doseg gibanja	Os 1 (okretanje)	$340^\circ (\pm 170^\circ)$
	Os 2 (donja ruka)	$245^\circ (-145^\circ \sim +90^\circ)$
	Os 3 (gornja ruka)	$360^\circ (-170^\circ \sim +190^\circ)$
	Os 4 (valjanje šake)	$360^\circ (\pm 180^\circ)$
	Os 5 (posrtanje)	$280^\circ (-50^\circ \sim +230^\circ)$
	Os 6 (valjanje šake)	$720^\circ (\pm 360^\circ)$
Maksimalna brzina oko pojedinih osi	Os 1 (okretanje)	2,62 rad/s (150 °/s)
	Os 2 (donja ruka)	2,79 rad/s (160 °/s)
	Os 3 (gornja ruka)	2,97 rad/s (170 °/s)
	Os 4 (valjanje šake)	5,93 rad/s (340 °/s)
	Os 5 (posrtanje)	5,93 rad/s (340 °/s)
	Os 6 (valjanje šake)	9,08 rad/s (520 °/s)
Dozvoljeni moment oko pojedinih osi	Os 4 (valjanje šake)	11,8 Nm
	Os 5 (posrtanje)	9,8 Nm
	Os 6 (valjanje šake)	5,9 Nm
Dozvoljeni moment inercije oko pojedinih osi	Os 4 (valjanje šake)	0,30 kgm ²
	Os 5 (posrtanje)	0,25 kgm ²
	Os 6 (valjanje šake)	0,06 kgm ²
Doseg gornje ruke		3,14 m ² x 340°
Uvjeti okoline	Temperatura	0° ~ 46° C
	Vlažnost zraka	20% ~ 80% (nekondenzirajuća)
Masa		155 kg
Maksimalna nosivost gornje ruke		10 kg
Vrsta motora za pogon		Servo motor
Snaga motora za pogon		2750 W
Informacija o poziciji		Apsolutni enkoder
Mogućnost instaliranja		Podno ili na zidne nosače
Boja		Ruke: bijela, Postolje: plavo

5.1.2. Izvor struje VARTIG 3500 digit AC/DC

Izvori struje VARTIG namijenjeni su za zavarivanje TIG postupkom. Omogućavaju također REL zavarivanje s obloženom elektrodom. Omogućavaju digitalni prikaz parametara zavarivanja i LED signalizaciju režima rada. Izvor struje zavarivanja digitalne generacije VARTIG 3500 digit AC/DC, koristi se za zavarivanje postupcima AC, DC I AC/DC. Omogućavaju također mogućnost izbora i pohranjivanja korisničkih programa zavarivanja. Tehničke karakteristike izvora struje VARTIG 3500 digit AC/DC prikazane su u tablici 5.

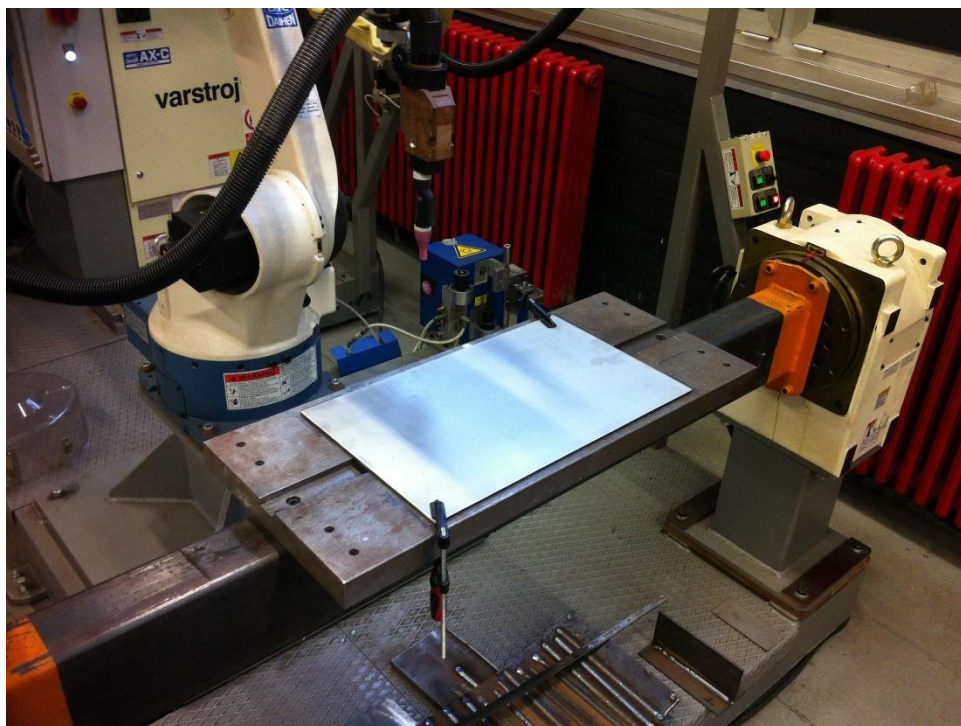
Tablica 5. Tehničke karakteristike izvora struje VARTIG 3500 digit AC/DC [26]

Priključni napon	3 ~ 400 V/50
Područje struje zavarivanja TIG DC	4-300 A
Područje struje zavarivanja TIG AC	10-300 A
Područje struje zavarivanja TIG AC/DC	10-300 A
Područje struje zavarivanja REL	10-250 A
Napon zavarivanja REL/TIG	21-30,5 V/10,2-22 V
Interminacija REL 40%	300 A (DC)
Interminacija REL 60%	245 A (DC)
Interminacija REL 100%	190 A (AC)
Promjer elektrode za REL zavarivanje	1,5-5,0 mm

5.2. Robotizirano navarivanje

5.2.1. Osnovni materijal

Navarivanje je provedeno na austenitnom čeliku sniženog masenog udjela ugljika kvalitete AISI 304 - W.Nr 1.4301. Austenitni nehrđajući čelik je dobre čvrstoće i odlične korozijske otpornosti. Toplinska i električna vodljivost nije im izražena u usporedbi s bakrenim legurama i nisu magnetični. Razni oblici “pitting“ korozije javljaju se samo u toplim atmosferama s većom koncentracijom klorida. 304L je varijanta s manjim udjelom ugljika i pogodnija je za zavarivanje. U tablici 6. nalazi se kemijska analiza materijala AISI 304.



Slika 30. Stezanje osnovnog materijala

Tablica 6. Kemijska analiza austenitnih AISI 304 ploča debljine 5 [mm]

C	Fe	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	V	Cu
0,08	71,75	18	7,81	1,32	0,262	0,32	0,19	0,34

5.2.2. Volframova elektroda

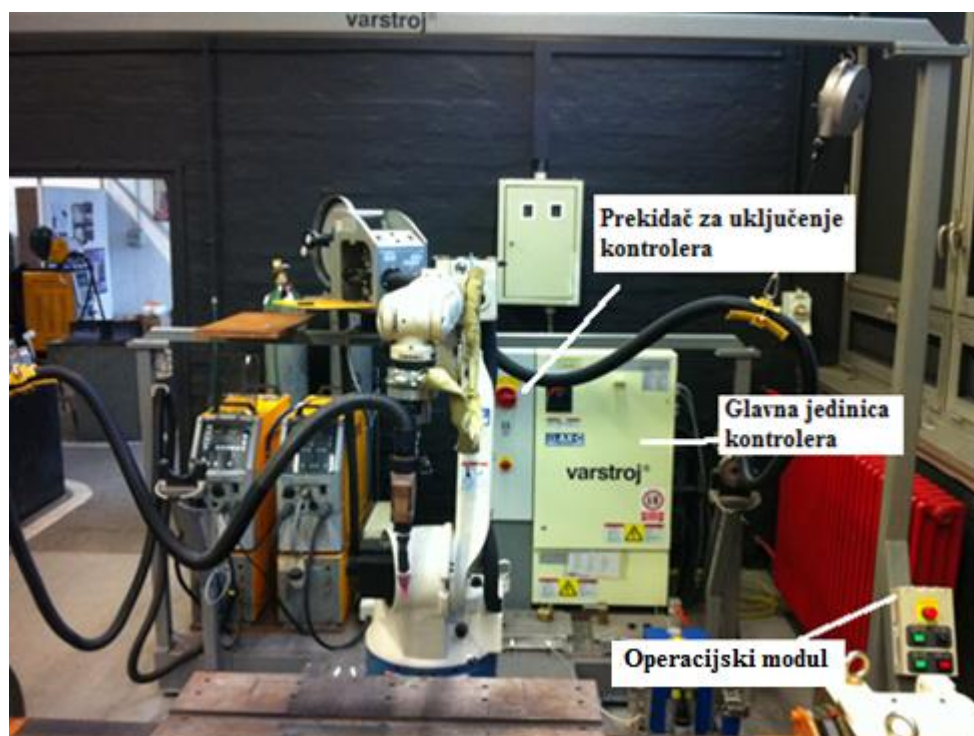
Za potrebe eksperimenta odabrana je volframova elektroda legirana s torijevim oksidima. Dugog su vijeka trajanja, otporne su na veće struje i imaju stabilan luk kod DC struje. Promjer elektrode je $d = 1,6$ [mm], a dodatni materijal se nije koristio. Elektroda ovakvog oblika namijenjena je za automatizirano i robotizirano zavarivanje. S obzirom da se koristi elektroda spojena na (-) pol kada nema pojave efekta čišćenja. Prije navarivanja ručno se provodi čišćenje površine radnog komada alkoholom (etanol 96%).

5.2.3. Zaštitni plin

Austenitni čelici prilikom navarivanja u zoni utjecaja topline stvaraju okside koji kasnije mogu uzrokovati neki od oblika korozije. Zbog toga je potrebno osigurati odgovarajući protok inertnog plina, koji će štititi navar tijekom navarivanja od utjecaja vanjske atmosfere. U eksperimentalnom dijelu rada se kao zaštitni plin koriste dvije vrste plina: jedan plin je 100% Ar, a drugi 95% Ar + 5% H₂, uz protok 9 l/min.

5.2.4. Programiranje robota

Robot se uključuje preko prekidača za uključenje kontrolera, koji se nalazi na glavnoj jedinici kontrolera, slika 31.



Slika 31. AX-C kontroler

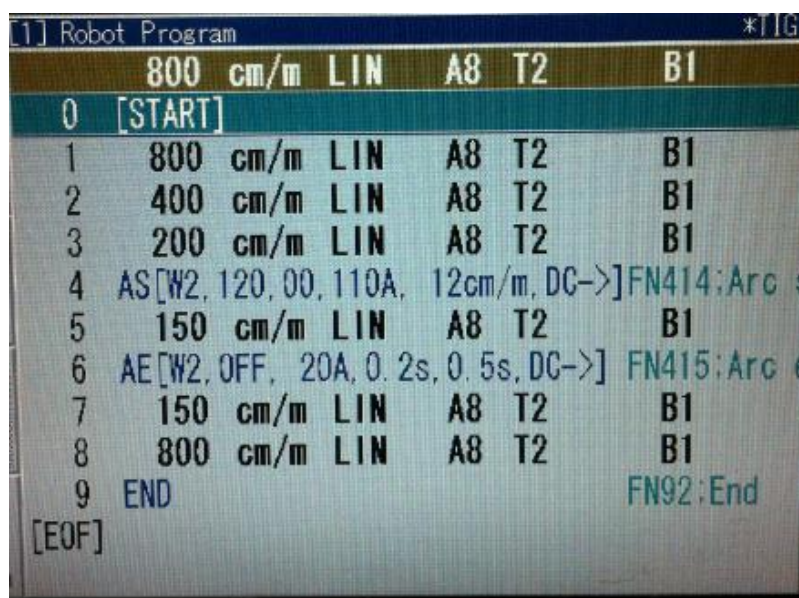
Kada se robot uključi, preko privjeska za učenje se odabire program za izvođenje operacije navarivanja. U ovom slučaju se odabire već kreirani program na sljedeći način:

1. Odabrati "Teach" opciju.
2. držeći tipku [ENABLE], pritisnuti tipku [PROG/STEP] te se otvara prozor u kojem odabiremo program pod brojem 70, slika 32.



Slika 32. Odabir programa za izvođenje postupka navarivanja



Na slici 33. je prikazan robotski program za izvođenje navarivanja. Robot se iz početnog položaja (točka 0) kreće prema radnom komadu od točke 1 do točke 3. U točki 4 (AS) uspostavlja se električni luk, koji je uključen do točke 6 (AE), gdje se gasi te preko točaka 7, 8 i 9 vraća u početni položaj.



Slika 33. Robotski program broj 70

5.2.5. Mijenjanje parametara navarivanja

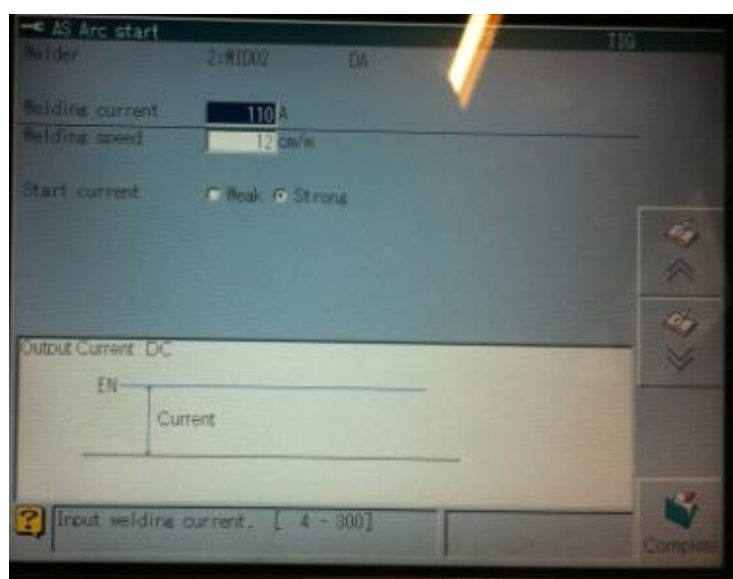
Prilikom TIG postupka navarivanja potrebno je bilo mijenjati parametre kako bi se vidjelo kolika je dubina penetracije, širina zavora i sl. za različite vrijednosti jakosti struje. Parametri, odnosno vrijednosti struje se podešavaju na sljedeći način:

1. Pritisnuti tipku [EDIT].
2. Tipkom se  spustiti do točke 4, a zatim tipkom ući  u opcije za podešavanje parametara.
3. Preko tipke [f11] se odabire opcija *Input Value* unutar koje se mijenjaju vrijednosti struje, slika 34.



Slika 34. Prozor za zadavanje parametara

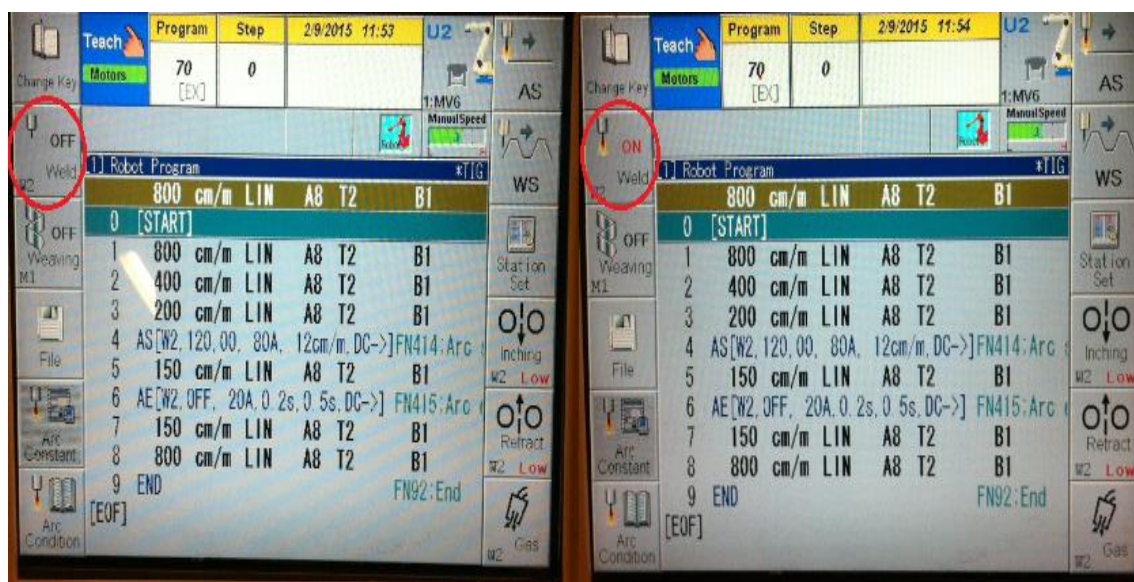
4. Pritiskom na tipku [f12] odabire se opcija *Complete* parametri su podešeni.



Slika 35. Prozor za zadavanje vrijednosti jakosti struje

5.2.6. Robotizirano navarivanje

Kada je radni komad postavljen, očišćen i stegnut, robot isprogramiran i kada su zadane vrijednosti struje robot se stavlja u automatski rad te počinje s radom. No prije prebacivanja robota u automatski rad treba odabrati način rada, bez električnog luka, odnosno prazan hod, kako bi se vidjelo kreće li se robot željenom putanjom zavarivanja te način rada s električnim lukom, slika 36.



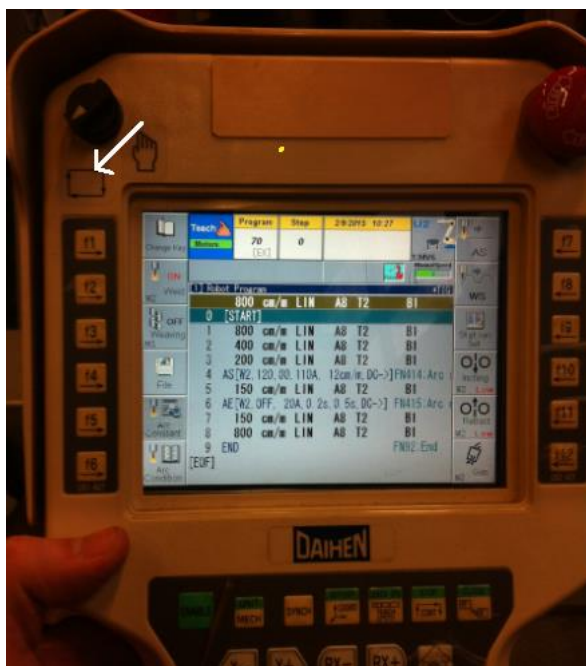
a) bez električnog luka

b) s električnim lukom

Slika 36. Odabir načina rada

Stavljanje robota u automatski rad se provodi pomoću privjeska za učenje i operacijskog modula na sljedeći način:

1. Na privjesku za učenje se On/Off line prekidač postavlja na automatski rad.



Slika 37. Postavljanje u automatski rad na privjesku za učenje

2. Na operacijskom modulu se također stavlja u automatski rad te se pritišće tipka [START].



Slika 37. postavljanje u automatski rad na operacijskom modulu

5.3. Analiza i rezultati ispitivanja

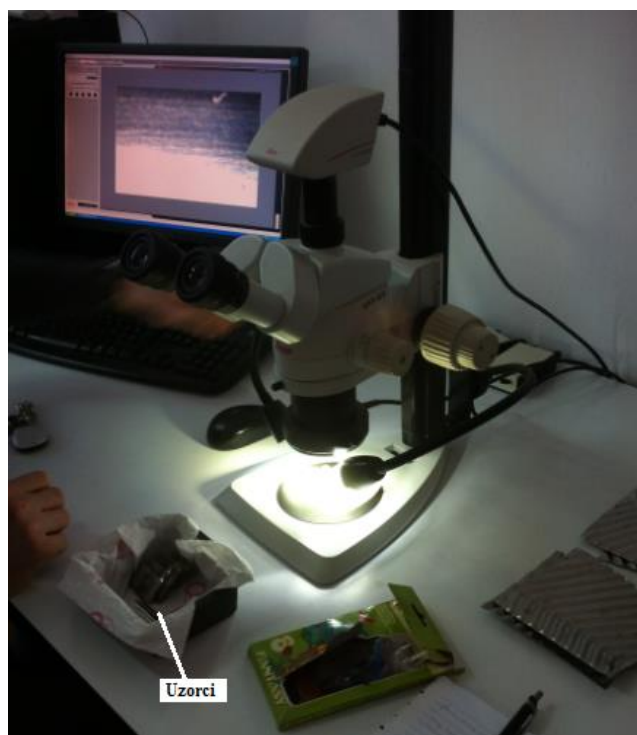
Na slici 38. prikazana je ploča s šest navara, s dvije vrste inertnog plina. Sa svakom vrstom plina izvedena su tri prolaza, s različitim vrijednostima struje.



Slika 38. Ispitna ploča s navarima


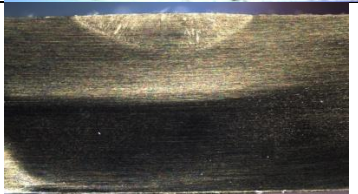

Kako bi se moglo provesti makro ispitivanje, ispitnu ploču je potrebno izrezati na manje uzorke nakon završenog procesa navarivanja. Priprema uzoraka za makro ispitivanje se odvija na sljedeći način:

1. Rezanje ispitne ploče na CNC stroju za rezanje i zavarivanje. Stroj koristi plazma rezanje zrakom, pri jakosti struje 80 A i brzini $v=88$ cm/min.
2. Rezanje uzoraka s CNC stroja za rezanje i zavarivanje na manje uzorke na tračnoj pili.
3. Brušenje uzoraka s tračne pile na brusilici.
4. Ručno brušenje uzoraka na brusnim papirima s različitom finoćom brusnih zrnaca (120, 320, 500, 600)
5. Poliranje na uređaju Grinder – polisher brusnim papirima od silikon karbida (SiC) (P500, P1000, P2000, P4000)
6. Elektrolitsko nagrivanje u 10% oksalnoj kiselini, u trajanju od 3 minute pri 1 A i 4-5 V
7. Makro ispitivanje na mikroskopu Leica MZ6 u Laboratoriju za zaštitu materijala, FSB, slika 39.






Slika 39. Mikroskop Leica MZ6

Tablica 7. Prikaz makroizbrusaka za različite vrijednosti struje i napona uz 100% Ar

Uzorak	Makroizbrusci	Jakost struje [A]	Napon [V]
1		80	10,2
2		95	10,8
3		110	11,2

Tablica 8. Prikaz makroizbrusaka za različite vrijednosti struje i napona uz 95% Ar

Uzorak	Makroizbrusci	Jakost struje [A]	Napon [V]
4		110	14,3
5		95	13,5
6		80	11,1

Iz tablice 7. je vidljivo da s povećanjem vrijednosti jakosti struje navar postaje širi, dok je za iste te vrijednosti, ali s drugim plinom, odnosno 95% Ar, penetracija veća, što je vidljivo iz tablice 8.

6. Zaključak

Svake godine se u svijetu broj robota za zavarivanje značajno povećava. Razlog tomu su prednosti koje pruža robotizirana proizvodnja te kontinuirani napredak na području robotike. Također, unaprijeđuju se i postupci zavarivanja pogodni za robotizaciju. Zbog toga su i u teorijskom dijelu rada analizirane opcije automatizacije i robotizacije TIG postupka zavarivanja, s posebnim naglaskom na koncept vruće žice.

Stoga se može reći da je TIP TIG postupak zavarivanja automatiziran i suvremen postupak, koji ima određene prednosti, ali i mane.

Na temelju ovog rada moguće je zaključiti da su prednosti TIP TIG postupka sljedeće:

- lako se automatizira, a efikasnost mu raste uporabom varijante s vrućom žicom,
- znatno veći depozit u odnosu na klasični TIG,
- visoku kvalitetu zavora,
- dobar estetski izgled i geometriju zavora bez potrebe za naknadnom obradom,
- veća brzina zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je robotizirano i automatizirano TIG navarivanje bez dodatnog materijala. Također je objašnjeno On-line programiranje robota te podešavanje i mijenjanje parametara.

On-line programiranje robota je jednostavno i lako se uči, ali je relativno sporo te bi se u slučaju proizvodnje u kojoj se često mijenja program izgubilo previše vremena na programiranje. Također za vrijeme programiranja robot ne može obavljati proizvodnu funkciju. Uzme li se u obzir da u pogonu zna biti i više robota to je jako dugotrajna metoda. Stoga On-line programiranje nije optimalan pristup i svakako bi se trebalo razmisliti o drugim opcijama u pogledu Off-line i hibridnog programiranja pri rješavanju određenih zahtjeva u robotiziranoj proizvodnji.

7. Literatura

- [1]; ISO 10218; Manipulating industrial robots – Safety, 1992.
- [2] <http://bs.scribd.com/doc/143853387/Zavarivanje-TIG-Postupkom#scribd>
- [3] Živčić, M.: Tig zavarivanje – osnovne karakteristike postupka, Zavarivanje, 1985., broj 1.
- [4] TIG handbook Miller
- [5] Garašić I.: Predavanja iz kolegija "Postupci zavarivanja", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2006.
- [6] ASM International Handbook Committee: ASM Handbook – Welding, Brazing and Soldering, ASM International Materials park, 1993.
- [7] Milotić M.: Priručnik za zavarivače 2. Dopunjeno izdanje, 2008
- [8] TIG welding – method and application, AWS, 1992.
- [9] Panjković V.: Zavarivanje visokolegiranih nehrđajućih čelika TIG postupkom s vrućom žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [10] IWE, Predavanja iz kolegija "Postupci zavarivanja i oprema za zavarivanje", listopad, 2004.
- [11] Čordaš D.: Orbitalno zavarivanje nehrđajućih čelika TIG postupkom, vlastita naklada, Pula, 2007.
- [12] www.k-tig.com
- [13] Mike Wilson: TIP TIG: new technology for welding, 462-6, Industrial Robot, 6/2007.
- [14] Garašić I., Kožuh Z., Bauer B.: Predavanja iz kolegija "Strojevi i oprema za zavarivanje", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2013.
- [15] www.dvs-ev.de/bvrostock/downloads/schemadarstellung.pdf
- [16] www3.fronius.com/worldwide/us/products/paper_tig_hotwire_surfacing_bochum_germany_gb.pdf
- [17] Filetin T.; Kovačiček F.; Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Udžbenici sveučilišta u Zagrebu, Fakultet Strojarsstva i Brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [18] Introduction to robotics: trajectory generation and robot programming; lectures, FH Darmstadt, Darmstadt, Germany, 2000.
- [19] J. N. Pires; Industrial robot programming: building application for the factories of the future; Springer Science+Business Media, LLC, New York, USA, 2007
- [20] Šurina, T. Robotizacija u tehnici zavarivanja. Zavarivanje 34. 1991, str. 171-5
- [21] M. Olsson; Simulation and execution of autonomous robot systems; Phd Thesis, Department of Mechanical Engineering, Lund University, Lund, Sweden, 2002.
- [22] J. N. Pires, A. Loureiro, G. Holmsjö; Welding robots: technology, system issues and applications; Springer Science+Business Media, LLC, New York, USA, 2006
- [23] U. Diltthey; Welding & Cutting Technologies; ISF - Welding Institute; RWTH - Aachen University, 2003
- [24] Servus d.o.o.: Podloge za polaznike EWE tečaja "TIP TIG postupak zavarivanja", prosinac, 2012.
- [25] Petrović V.: Moderni robotski sustavi za elektrolučno zavarivanje, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [26] http://www.varstroj.si/tl_files/pdf/VarstrojKatalogHR.pdf